



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**EVALUASI *SETTING* WAKTU RELE PENGAMAN
DI PT. PETROKIMIA GRESIK DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN *TRANSIENT STABILITY*
*ASSESSMENT***

Fauzan Fakhrol Arifin
NRP 07111440000104

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

***EVALUATION OF THE PROTECTION RELAY TIME
SETTINGS IN PT. PETROKIMIA GRESIK BY CONSIDERING
TRANSIENT STABILITY ASSESSMENT***

Fauzan Fakhrol Arifin
NRP 07111440000104

Advisor
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Evaluasi Setting Waktu Rele Pengaman di PT. Petrokimia Gresik dengan Mempertimbangkan *Transient Stability Assessment***” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2018

Fauzan Fakhrol Arifin
07111440000104

Halaman ini sengaja dikosongkan

**EVALUASI SETTING WAKTU RELE PENGAMAN
DI PT. PETROKIMIA GRESIK DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN *TRANSIENT STABILITY*
ASSESSMENT**


TUGAS AKHIR


Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
NIP. 19730927 199803 1 004


Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.
NIP. 19881108 201212 1 001



EVALUASI *SETTING* WAKTU RELE PENGAMAN DI PT. PETROKIMIA GRESIK DENGAN MEMPERTIMBANGKAN *TRANSIENT STABILITY* *ASSESSMENT*

Nama : Fauzan Fakhrol Arifin
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dosen Pembimbing II : Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

ABSTRAK

Pada suatu sistem tenaga listrik, koordinasi proteksi yang baik sangat diperlukan agar keandalan dan kontinyuitas pendistribusian tenaga listrik menjadi lebih tinggi. Ketika terjadi gangguan, rele pengaman akan mendeteksi gangguan dan mentrigger *circuit breaker* untuk bekerja dalam waktu tertentu untuk mengisolir gangguan, namun hal ini tidak menjamin sistem masih berada dalam kondisi stabil. Analisis kestabilan transien dibutuhkan agar keandalan dan kestabilan sistem terjaga. Analisis kestabilan transien erat kaitannya dengan perhitungan nilai *CCT* (*Critical Clearing Time*). *CCT* merupakan perhitungan batas waktu pemutusan kritis setelah terjadi gangguan. Dengan kata lain, agar sistem dapat kembali stabil, maka saat terjadi gangguan sistem harus diputus sebelum waktu *CCT*. Saat ini, sistem kelistrikan pada PT. Petrokimia Gresik telah mempunyai *setting* rele pengaman, namun *setting* waktu rele yang diterapkan belum mempertimbangkan nilai dari *CCT*. Oleh karena itu, perlu dilakukan perhitungan nilai *CCT* sehingga perusahaan menjadi lebih andal, stabil, dan terjaga kontinyuitasnya. Nilai *CCT* yang didapatkan nantinya akan dijadikan sebagai bahan pertimbangan untuk *setting* waktu rele pengaman. Metode yang digunakan adalah *Time Domain Simulation method* (TDS) dengan memperhatikan respon sudut rotor generator. Dari analisis yang telah dilakukan, masih terdapat delapan bus yang *setting* waktu rele pengamannya masih memerlukan perbaikan karena masih bekerja di atas nilai *CCT*. Oleh karena itu, diberikan rekomendasi yaitu penambahan peralatan pengaman berupa rele diferensial yang mampu bekerja mengisolir gangguan dalam waktu 1-3 *cycle* sehingga sistem dapat berada dalam kondisi stabil.

Kata kunci: evaluasi *setting* waktu rele, kestabilan transien, *critical clearing time*

Halaman ini sengaja dikosongkan

EVALUATION OF THE PROTECTION RELAY TIME SETTINGS IN PT. PETROKIMIA GRESIK BY CONSIDERING TRANSIENT STABILITY ASSESSMENT

Name : Fauzan Fakhrol Arifin
Advisor I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Advisor II : Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT.

ABSTRACT

Electric power system requires the good protection coordination so that the reability and continuity of electricity distribution to get better. When an interruption occurs, the relay protection detects the interference and triggers the circuit breaker to work within a certain time to isolate the interference, but this does not guarantee the system is still in stable condition. Transient stability analysis is required so that the reability and stability of the systems fullfilled. The transient stability analysis closely related to the CCT (Critical Clearing Time). CCT is the calculation of the critical time limit after the disturbance occurs. In other words, when a system failure occurs, it must be disconnected before the time of CCT, so the system can return to the stable condition. Currently, the electrical system at PT. Petrokimia Gresik already has the protection relay time settings, but the time settings applied have not considered the value of CCT. Therefore, it is necessary to calculate the values of CCT so that the reability, stability, and continuity of the systems fullfilled. CCT value obtained later will be taken into consideration for the protection relay time settings. The method used is Time Domain Simulation method (TDS) with observe to rotor generator response. From the analysis that has been done, there are eight buses that still require recommendation because it still works above the value of CCT. Therefore, given a recommendation the addition of safety equipment in the form of differential relay that can work to isolate the interruption within 1-3 cycles so that the system can be in stable condition.

Keywords: *evaluation of the protection relay time settings, transient stability, critical clearing time*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur saya panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, karunia, dan petunjuk-Nya, sehingga saya selaku penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Evaluasi Setting Waktu Rele Pengaman di PT. Petrokimia Gresik dengan Mempertimbangkan *Transient Stability Assessment*”**.

Tujuan penyusunan Tugas Akhir ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam penulisan Tugas Akhir ini, tentunya tidak lepas dari dukungan dan bantuan orang-orang yang telah banyak membantu penulis. Untuk itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Kedua orang tua tercinta, Ibu Tutik Suwartini dan Bapak Suyadi, serta adik Luthfiah Sabrina Awanis, yang selalu memberikan dukungan dan doa dalam keadaan apapun untuk keberhasilan penulis. Semoga mereka selalu berada dalam lindungan dan rahmat Allah SWT.
3. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. dan Bapak Dr. Dimas Fajar Uman Putra, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, bimbingan, dan perhatiannya selama proses penyelesaian Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan bimbingan selama penulis menempuh pendidikan di Teknik Elektro ITS.
5. Rekan-rekan Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) ITS atas segala dukungan, bantuan, kebersamaan, dan kerjasamanya.
6. Teman-teman seperjuangan angkatan e54 atas dukungan dan kerjasamanya selama masa kuliah hingga penyusunan Tugas Akhir ini.
7. Kawan-kawan W303, Januardi, Guntur, Aden, Akhid, Lazuardi, Faldy, dan Stanley, atas kenangan dan dukungannya.
8. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan Tugas Akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari dalam penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan dan kesalahan. Oleh karena itu, saya selaku penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun dari pembaca

untuk perbaikan dan penyempurnaan penulisan Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas dan dapat berkembang di masa yang akan datang.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

JUDUL

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xv

BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Tugas Akhir	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	5

BAB 2 PROTEKSI DAN KESTABILAN SISTEM TENAGA	7
2.1 Proteksi Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.1.1 Gangguan Sistem Tenaga Listrik	7
2.1.2 Penyebab Gangguan Arus Lebih	8
2.2 Kestabilan Sistem Tenaga	8
2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor	10
2.2.2 Kestabilan Frekuensi.....	11
2.2.3 Kestabilan Tegangan.....	13
2.3 Kestabilan Transien	15
2.3.1 Gangguan Hubung Singkat	16
2.3.2 Motor Starting	16
2.3.3 Penambahan Beban Secara Tiba-Tiba	17
2.4 Persamaan Ayunan.....	17
2.5 Waktu Pemutusan Kritis (<i>Critical Clearing Time</i>).....	18

BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA GRESIK....	21
3.1 Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik	21

3.2 Pembangkitan, Pembebanan, dan <i>Demand</i> Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik	22
3.3 Kapasitas Pembangkit di PT. Petrokimia Gresik	22
3.4 Sistem Distribusi di PT. Petrokimia Gresik	24

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS DATA.....27

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik	27
4.2 Studi Kasus Kestabilan Transien	27
4.3 Hasil Simulasi Kestabilan Transien dan Penentuan Nilai <i>Critical Clearing Time (CCT)</i>	29
4.3.1 Studi Kasus 1: <i>CCT</i> pada bus 11 KV MVSWGR	29
4.3.2 Studi Kasus 2: <i>CCT</i> pada bus 20 KV MVSWGR	31
4.3.3 Studi Kasus 3: <i>CCT</i> pada BUS11A	32
4.3.4 Studi Kasus 4: <i>CCT</i> pada bus 20BUS86	34
4.3.5 Studi Kasus 5: <i>CCT</i> pada bus HVS-00-20KV/GI A	35
4.3.6 Studi Kasus 6: <i>CCT</i> pada bus HVS-00-20KV/GI B	37
4.3.7 Studi Kasus 7: <i>CCT</i> pada bus UBB 6 KV	38
4.3.8 Studi Kasus 8: <i>CCT</i> pada bus UBB 20 KV A	40
4.3.9 Studi Kasus 9: <i>CCT</i> pada bus UBB 20 KV B	41
4.3.10 Studi Kasus 10: <i>CCT</i> pada BUS 11	43
4.3.11 Studi Kasus 11: <i>CCT</i> pada BUS GTG	44
4.3.12 Studi Kasus 12: <i>CCT</i> pada bus HVS-02.A/20KV	46
4.3.13 Studi Kasus 13: <i>CCT</i> pada bus HVS-02.A/20KV B	47
4.3.14 Studi Kasus 14: <i>CCT</i> pada bus HVS-00-20KV/UT-L-P B	49
4.3.15 Studi Kasus 15: <i>CCT</i> pada bus HVS-00-20KV/UT-L-P	50
4.3.16 Studi Kasus 16: <i>CCT</i> pada bus SS1000	52
4.3.17 Studi Kasus 17: <i>CCT</i> pada bus SS1000 20 KV	53
4.4 Perbandingan Hasil <i>CCT</i> dengan <i>Setting</i> Waktu Rele Pengaman Eksisting PT. Petrokimia Gresik	55
4.5 Evaluasi <i>Setting</i> Waktu Rele Pengaman di PT. Petrokimia Gresik dengan Mempertimbangkan <i>Transient Stability Assessment</i>	57
4.6 Perbandingan Respon Sudut Rotor Generator Sebelum dan Sesudah Dilakukan Evaluasi	58
4.6.1 Evaluasi pada bus 11 KV MVSWGR	58
4.6.2 Evaluasi pada bus 20BUS86	60
4.6.3 Evaluasi pada bus HVS-00-20KV/GI A	61
4.6.4 Evaluasi pada bus HVS-00-20KV/GI B	63
4.6.5 Evaluasi pada bus UBB 20 KV A	64
4.6.6 Evaluasi pada bus UBB 20 KV B	66

4.6.7 Evaluasi pada BUS GTG	67
4.6.8 Evaluasi pada bus HVS-02.A/20KV B	69
BAB 5 PENUTUP	71
5.1 Kesimpulan.....	71
5.2 Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN	75
BIOGRAFI PENULIS	77

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik [4]	9
Gambar 2.2 Respon Sudut Rotor Ketika Terkena Gangguan Transien 11	
Gambar 2.3 Standar Operasi Frekuensi untuk <i>Steam Turbin Generator</i> Menurut IEEE Std. C37.106-2003 [9]	13
Gambar 2.4 Kategori Fenomena Tegangan Tenaga Listrik Menurut IEEE 1159-1995 [10]	14
Gambar 3.1 Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik.....	21
Gambar 4.1 Respon sudut rotor studi kasus 1 waktu pemutusan 0,25 s	30
Gambar 4.2 Respon sudut rotor studi kasus 1 waktu pemutusan 0,26 s	30
Gambar 4.3 Respon sudut rotor studi kasus 2 waktu pemutusan 0,62 s	31
Gambar 4.4 Respon sudut rotor studi kasus 2 waktu pemutusan 0,63 s	32
Gambar 4.5 Respon sudut rotor studi kasus 3 waktu pemutusan 0,64 s	33
Gambar 4.6 Respon sudut rotor studi kasus 3 waktu pemutusan 0,65 s	33
Gambar 4.7 Respon sudut rotor studi kasus 4 waktu pemutusan 0,39 s	34
Gambar 4.8 Respon sudut rotor studi kasus 4 waktu pemutusan 0,40 s	35
Gambar 4.9 Respon sudut rotor studi kasus 5 waktu pemutusan 0,40 s	36
Gambar 4.10 Respon sudut rotor studi kasus 5 waktu pemutusan 0,41 s.....	36
Gambar 4.11 Respon sudut rotor studi kasus 6 waktu pemutusan 0,36 s.....	37
Gambar 4.12 Respon sudut rotor studi kasus 6 waktu pemutusan 0,37 s.....	38
Gambar 4.13 Respon sudut rotor studi kasus 7 waktu pemutusan 0,73 s.....	39
Gambar 4.14 Respon sudut rotor studi kasus 7 waktu pemutusan 0,74 s.....	39
Gambar 4.15 Respon sudut rotor studi kasus 8 waktu pemutusan 0,37 s.....	40

Gambar 4.16	Respon sudut rotor studi kasus 8 waktu pemutusan 0,38 s	41
Gambar 4.17	Respon sudut rotor studi kasus 9 waktu pemutusan 0,46 s	42
Gambar 4.18	Respon sudut rotor studi kasus 9 waktu pemutusan 0,47 s	42
Gambar 4.19	Respon sudut rotor studi kasus 10 waktu pemutusan 0,42 s	43
Gambar 4.20	Respon sudut rotor studi kasus 10 waktu pemutusan 0,43 s	44
Gambar 4.21	Respon sudut rotor studi kasus 11 waktu pemutusan 0,38 s	45
Gambar 4.22	Respon sudut rotor studi kasus 11 waktu pemutusan 0,39 s	45
Gambar 4.23	Respon sudut rotor studi kasus 12 waktu pemutusan 0,52 s	46
Gambar 4.24	Respon sudut rotor studi kasus 12 waktu pemutusan 0,53 s	47
Gambar 4.25	Respon sudut rotor studi kasus 13 waktu pemutusan 0,48 s	48
Gambar 4.26	Respon sudut rotor studi kasus 13 waktu pemutusan 0,49 s	48
Gambar 4.27	Respon sudut rotor studi kasus 14 waktu pemutusan 0,37 s	49
Gambar 4.28	Respon sudut rotor studi kasus 14 waktu pemutusan 0,38 s	50
Gambar 4.29	Respon sudut rotor studi kasus 15 waktu pemutusan 1,93 s	51
Gambar 4.30	Respon sudut rotor studi kasus 15 waktu pemutusan 1,94 s	51
Gambar 4.31	Respon sudut rotor studi kasus 16 waktu pemutusan 0,31 s	52
Gambar 4.32	Respon sudut rotor studi kasus 16 waktu pemutusan 0,32 s	53
Gambar 4.33	Respon sudut rotor studi kasus 17 waktu pemutusan 0,36 s	54
Gambar 4.34	Respon sudut rotor studi kasus 17 waktu pemutusan 0,37 s	54

Gambar 4.35	<i>Setting waktu rele pengaman eksisting PT. Petrokimia Gresik.....</i>	55
Gambar 4.36	Pemasangan Rele Diferensial pada Bus yang Memerlukan Perbaikan	58
Gambar 4.37	Respon sudut rotor studi kasus bus 11 KV MVSWGR sebelum dilakukan evaluasi	59
Gambar 4.38	Respon sudut rotor studi kasus bus 11 KV MVSWGR setelah dilakukan evaluasi.....	59
Gambar 4.39	Respon sudut rotor studi kasus bus 20BUS86 sebelum dilakukan evaluasi	60
Gambar 4.40	Respon sudut rotor studi kasus bus 20BUS86 setelah dilakukan evaluasi	61
Gambar 4.41	Respon sudut rotor studi kasus bus HVS-00-20KV/GI A sebelum dilakukan evaluasi.....	62
Gambar 4.42	Respon sudut rotor studi kasus bus HVS-00-20KV/GI A setelah dilakukan evaluasi.....	62
Gambar 4.43	Respon sudut rotor studi kasus bus HVS-00-20KV/GI B sebelum dilakukan evaluasi.....	63
Gambar 4.44	Respon sudut rotor studi kasus bus HVS-00-20KV/GI B setelah dilakukan evaluasi	64
Gambar 4.45	Respon sudut rotor studi kasus bus UBB 20 KV A sebelum dilakukan evaluasi	65
Gambar 4.46	Respon sudut rotor studi kasus bus UBB 20 KV A setelah dilakukan evaluasi.....	65
Gambar 4.47	Respon sudut rotor studi kasus bus UBB 20 KV B sebelum dilakukan evaluasi	66
Gambar 4.48	Respon sudut rotor studi kasus bus UBB 20 KV B setelah dilakukan evaluasi.....	67
Gambar 4.49	Respon sudut rotor studi kasus BUS GTG sebelum dilakukan evaluasi	68
Gambar 4.50	Respon sudut rotor studi kasus BUS GTG setelah dilakukan evaluasi	68
Gambar 4.51	Respon sudut rotor studi kasus bus HVS-02.A/20 KV B sebelum dilakukan evaluasi.....	69
Gambar 4.52	Respon sudut rotor studi kasus bus HVS-02.A/20 KV B setelah dilakukan evaluasi	70

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Rangkuman Jumlah Pembangkitan, Pembebanan, dan <i>Demand</i>	22
Tabel 3.2 Data Kapasitas Pembangkit di PT. Petrokimia Gresik	23
Tabel 3.3 Data Tranformator pada PT. Petrokimia Gresik.....	24
Tabel 4.1 Bus yang Akan Dilakukan Analisis Kestabilan Transien	28
Tabel 4.2 Perbandingan waktu <i>trip</i> rele pengaman eksisting PT. Petrokimia Gresik dengan hasil <i>CCT</i>	56
Tabel 4.3 Hasil Perbaikan <i>Setting</i> Waktu Rele Pengaman	57

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Indonesia merupakan salah satu negara maritim dan semi agraris terbesar di dunia yang tentunya tidak dapat dipisahkan dari bidang pertanian sebagai sektor utama komoditas bahan pangan, dan pupuk merupakan bahan pendukung utama berkembangnya bidang ini. PT. Petrokimia Gresik sebagai salah satu perusahaan pupuk terbesar di Indonesia, tentu saja dituntut untuk dapat memajukan bangsa Indonesia dari segi pertanian maupun perkebunan. Sebuah industri yang besar, tentu tak lepas dari peran dan kebutuhan listrik yang besar pula di dalamnya. Kebutuhan tenaga listrik merupakan suatu hal yang krusial pada dunia industri untuk menjamin keberlangsungan proses produksi, tak terkecuali pada PT. Petrokimia Gresik. Saat ini, kebutuhan kelistrikan pada PT. Petrokimia Gresik disuplai dari sumber PLN dan beberapa pembangkit mandiri yang telah terinterkoneksi pada tegangan 20 kV.

Pada suatu sistem tenaga listrik, dibutuhkan sistem pengamanan yang mampu bekerja secara cepat dan tepat [1]. Maka dari itu, koordinasi proteksi yang baik sangat diperlukan agar keandalan dan kontinuitas pendistribusian tenaga listrik menjadi lebih tinggi. Ketika terjadi gangguan, rele pengamanan akan mendeteksi gangguan dan *mentrigger circuit breaker* untuk bekerja dalam waktu tertentu untuk mengisolir gangguan, namun hal ini tidak menjamin sistem masih berada dalam kondisi stabil. Suatu sistem tenaga listrik dikatakan stabil apabila saat terjadi gangguan, sistem tersebut dapat tetap berada dalam keadaan seimbang, atau setelah terjadi gangguan dapat kembali ke keadaan normalnya [2]. Analisis kestabilan transien dibutuhkan agar keandalan dan kestabilan sistem terjaga. Pada sistem tenaga listrik, analisis kestabilan transien erat kaitannya dengan perhitungan nilai *CCT* (*Critical Clearing Time*).

CCT merupakan perhitungan batas waktu pemutusan kritis setelah terjadi gangguan. Dengan kata lain, agar sistem dapat kembali stabil, maka saat terjadi gangguan sistem harus diputus sebelum waktu *CCT* [3], [4]. Salah satu cara untuk mendapatkan nilai *CCT* adalah dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation (TDS)* [5]. Saat ini, sistem kelistrikan pada PT. Petrokimia Gresik telah mempunyai *setting* waktu rele pengamanan, namun *setting* yang diterapkan belum

mempertimbangkan nilai dari *CCT*. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis *setting* waktu rele pengaman dengan mempertimbangkan *Transient Stability Assessment* pada PT. Petrokimia Gresik dengan memperhatikan respon sudut rotor generator akibat gangguan hubung singkat tiga fasa yang terjadi [6]. Nilai *CCT* yang didapatkan nantinya akan dijadikan sebagai bahan pertimbangan untuk *setting* waktu rele pengaman yang akan diterapkan untuk mengantisipasi terjadinya ketidakstabilan sistem setelah adanya gangguan.

1.2 Perumusan Masalah

Dalam Tugas Akhir ini, akan dibahas beberapa perumusan masalah, diantaranya:

1. Bagaimana melakukan analisis stabilitas transien pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik dengan menggunakan *Time Domain Simulation method*.
2. Bagaimana mendapatkan nilai *Critical Clearing Time* dengan melihat respon sudut rotor generator ketika terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa pada bagian jaringan interkoneksi tegangan menengah sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik.
3. Bagaimana melakukan evaluasi *setting* waktu rele pengaman pada PT. Petrokimia Gresik dengan mempertimbangkan nilai *Critical Clearing Time* dari analisis *Transient Stability Assessment* yang telah dilakukan.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada pengerjaan Tugas Akhir ini adalah:

1. Analisis *Transient Stability Assessment* yang dilakukan pada Tugas Akhir ini hanya pada bagian jaringan interkoneksi tegangan menengah sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik.
2. Parameter yang diamati dalam melakukan analisis kestabilan transien untuk menentukan *Critical Clearing Time* adalah respon sudut rotor generator akibat gangguan *short circuit* tiga fasa.
3. *Setting* waktu rele pengaman yang diamati pada Tugas Akhir ini hanya pada rele arus lebih.
4. Nilai *critical clearing time* yang ditemukan dalam bentuk rentang nilai dan sampai dua angka di belakang koma.

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dilakukannya Tugas Akhir ini antara lain:

1. Melakukan analisis stabilitas transien pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik dengan menggunakan *Time Domain Simulation method*.
2. Mendapatkan nilai *Critical Clearing Time* dengan melihat respon sudut rotor generator ketika terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa pada bagian jaringan interkoneksi tegangan menengah sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik menggunakan *software* ETAP 12.6.0.
3. Melakukan evaluasi *setting* waktu rele pengaman dengan mempertimbangkan nilai *Critical Clearing Time* dari analisis *Transient Stability Assessment* yang telah dilakukan sebagai bahan pertimbangan untuk perusahaan sehingga dapat menambah keandalan dan kestabilan sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik.

1.5 Metodologi

Metodologi yang akan digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Dalam pengerjaan tugas akhir ini, penulis melakukan studi literatur untuk memperkuat ide dan mencari teori penunjang melalui membaca dan mempelajari buku, jurnal ilmiah (*paper*), dan *browsing* melalui internet mengenai analisis kestabilan transien. Selain itu, penulis juga mempelajari perhitungan *CCT* (*Critical Clearing Time*) dan metode *TDS* (*Time Domain Simulation*) untuk menentukan kestabilan sistem tenaga listrik.
2. Pengumpulan Data
Penulis melakukan pengumpulan data-data yang dibutuhkan untuk tugas akhir ini. Data-data yang diperlukan antara lain adalah data *single line diagram* PT. Petrokimia Gresik dan data peralatan-peralatan listrik yang meliputi data generator, rating saluran atau kabel, transformator, bus, serta beban yang terpasang seperti motor listrik dan yang lainnya. Selain itu, data *setting* waktu rele pengaman eksisting juga diperlukan.
3. Pemodelan Sistem
Setelah mendapatkan data yang dibutuhkan, pada tahap ini penulis akan melakukan pemodelan sistem kelistrikan PT.

Petrokimia Gresik dalam bentuk *single line diagram*. Pemodelan dilakukan menggunakan *software* ETAP 12.6.0. Pemodelan ini bertujuan agar dapat melakukan simulasi dan analisis data.

4. Simulasi *Load Flow*
Simulasi *load flow* pada jaringan kelistrikan PT. Petrokimia Gresik bertujuan untuk mengetahui aliran daya dan tegangan di setiap bus pada sistem.
5. Simulasi *Transient Stability*
Pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik akan diasumsikan terjadi gangguan berupa hubung singkat tiga fasa dan akan dilihat respon sudut rotor generator saat terjadi gangguan.
6. Analisis Hasil Simulasi
Pada tahap ini akan dilakukan analisis respon sudut rotor generator saat terjadi gangguan untuk memperoleh nilai *CCT*. Nilai dari *CCT* nantinya akan dibandingkan dengan *setting* rele pengaman yang telah ada.
7. Penyusunan Laporan Tugas Akhir
Tahapan yang terakhir adalah penyusunan laporan Tugas Akhir dan menentukan kesimpulan serta memberikan rekomendasi mengenai *setting* waktu rele pengaman pada PT. Petrokimia Gresik setelah adanya pertimbangan nilai dari *CCT* sehingga sistem lebih stabil.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini disusun menjadi lima bab dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB 1: PENDAHULUAN

Menjelaskan tentang latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi atau manfaat penulisan Tugas Akhir.

BAB 2: PROTEKSI DAN KESTABILAN SISTEM TENAGA

Secara umum menjelaskan tentang dasar proteksi sistem tenaga listrik dan kestabilan sistem tenaga.

BAB 3: SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA GRESIK.

Menjelaskan mengenai sistem kelistrikan industri dan spesifikasi beban yang terdapat pada PT. Petrokimia Gresik.

BAB 4: SIMULASI DAN ANALISIS DATA

Membahas hasil simulasi analisis stabilitas transien pada bus-bus yang telah dipilih untuk memperoleh nilai *CCT*. Hal yang

perlu diperhatikan dalam mencari nilai *CCT* adalah respon sudut rotor generator saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa. Nilai *CCT* yang diperoleh akan dibandingkan dengan *setting* waktu rele pengaman yang sudah ada.

BAB 5: PENUTUP

Memberikan kesimpulan dan saran dari hasil analisis dan pembahasan yang telah diperoleh.

1.7 Relevansi

Hasil dari Tugas Akhir ini diharapkan nantinya dapat memberikan beberapa manfaat, antara lain:

1. Dapat digunakan sebagai rekomendasi atau bahan pertimbangan dalam menetapkan *setting* waktu rele pengaman dengan mempertimbangkan analisis kestabilan transien sehingga dapat menambah keandalan dan kestabilan pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik.
2. Dapat digunakan sebagai referensi untuk mahasiswa lain yang akan mengerjakan Tugas Akhir dengan topik atau permasalahan serupa.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

PROTEKSI DAN KESTABILAN SISTEM TENAGA

2.1 Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Pada suatu sistem tenaga listrik, koordinasi proteksi yang baik sangat diperlukan agar keandalan dan kontinuitas pendistribusian tenaga listrik dapat menjadi lebih tinggi. Ketika terjadi gangguan, rele pengaman akan mendeteksi gangguan dan mentrigger *circuit breaker* untuk bekerja dalam waktu tertentu untuk mengisolir gangguan. Hal ini dimaksudkan agar penyaluran distribusi tenaga listrik tidak terganggu dan peralatan tenaga listrik dapat lebih terjaga dari ancaman kerusakan karena gangguan [7]. Maka dari itu, sistem pengaman tenaga listrik harus didesain agar memiliki koordinasi yang baik pada setiap rele sehingga dapat mengisolir gangguan secara cepat dan tepat.

Koordinasi sistem proteksi harus memiliki desain yang baik antara setiap rele yang ada sesuai dengan letak terjadinya gangguan dan zona proteksinya. Zona proteksi terdiri dari zona primer dan zona *back up*. Rele proteksi zona primer merupakan rele yang terdekat dengan titik terjadinya gangguan. Apabila rele proteksi primer ini gagal bekerja, maka rele proteksi *back up* akan bekerja untuk mengisolir gangguan setelah beberapa waktu tunda (*time delay*).

2.1.1 Gangguan Sistem Tenaga Listrik

Pada saat terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik, titik terjadinya gangguan akan menerima arus kontribusi dengan nilai yang sangat besar. Arus-arus kontribusi ini dapat berasal dari motor-motor dan generator. Arus gangguan yang sangat besar ini berpotensi merusak peralatan-peralatan yang ada karena temperatur yang naik secara drastis.

Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu gangguan temporer atau sementara dan gangguan permanen. Gangguan temporer merupakan jenis gangguan yang dapat hilang dengan sendirinya atau gangguan akan hilang ketika bagian yang mengalami gangguan diputus secara sesaat dari sistem kelistrikan melalui *circuit breaker* yang terbuka karena sensing rele. Pada gangguan jenis ini, peralatan yang tadinya mengalami gangguan dapat dioperasikan kembali. Gangguan temporer dapat menjadi gangguan permanen jika gangguan yang terjadi tidak segera diatasi atau diisolir secara seketika. Sedangkan gangguan permanen merupakan jenis gangguan yang terjadi ketika

terdapat kerusakan yang bersifat permanen pada peralatan, sehingga gangguan ini hanya dapat dihilangkan atau diatasi dengan cara melepas peralatan yang mengalami gangguan untuk diperbaiki atau diganti sehingga dapat dioperasikan kembali.

2.1.2 Penyebab Gangguan Arus Lebih

Pada sistem tenaga listrik, gangguan yang paling sering terjadi adalah gangguan arus lebih. Gangguan arus lebih terbagi menjadi dua, yaitu gangguan karena *overload* atau beban lebih dan gangguan karena *short circuit* atau hubung singkat.

Gangguan beban lebih merupakan gangguan yang terjadi ketika arus yang mengalir ke dalam suatu peralatan tenaga listrik melebihi batas arus nominal yang diizinkan. Gangguan jenis ini dapat disebabkan oleh pengoperasian peralatan yang melebihi nilai *rating*-nya, atau adanya kegagalan isolasi pada suatu peralatan dalam suatu sistem. Peralatan yang terkena gangguan beban lebih harus segera diamankan agar terhindar dari kerusakan akibat arus yang melebihi kapasitas.

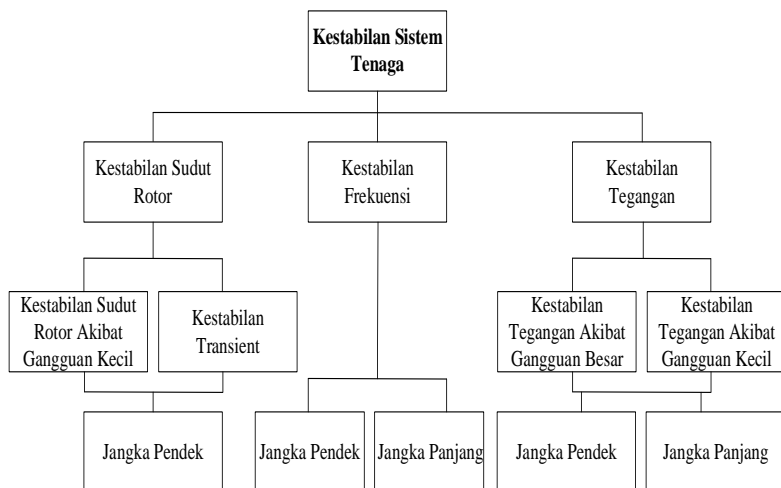
Gangguan hubung singkat merupakan gangguan yang terjadi karena adanya hubungan dari fasa atau *ground* yang seharusnya pada keadaan normal tidak terhubung. Gangguan jenis ini terbagi menjadi dua kelompok, yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat tak simetri atau asimetri. Gangguan yang termasuk dalam hubung singkat simetri adalah gangguan hubung singkat tiga fasa (L-L-L) dan hubung singkat tiga fasa ke tanah (L-L-L-G). Sedangkan gangguan yang termasuk dalam hubung singkat tak simetri adalah hubung singkat dua fasa (L-L), dua fasa ke tanah (L-L-G), dan satu fasa ke tanah (L-G). Gangguan hubung singkat tak simetri adalah gangguan hubung singkat yang paling umum terjadi.

2.2 Kestabilan Sistem Tenaga

Kestabilan merupakan salah satu hal pokok dalam suatu sistem tenaga listrik. Suatu sistem tenaga listrik dikatakan stabil apabila saat terjadi gangguan, sistem tersebut dapat tetap berada dalam keadaan seimbang, atau setelah terjadi gangguan dapat kembali ke keadaan normalnya [2]. Suatu sistem tenaga listrik yang stabil akan memperoleh keseimbangan antara daya input dan daya output, yaitu daya mekanik pada *prime mover* dan daya elektrik pada sistem. Dalam keadaan seimbang, jumlah torsi elektromagnetik dan torsi mekanik adalah sama. Jika salah satu dari dua parameter tersebut lebih besar dari yang lain,

maka sistem berada dalam keadaan tidak seimbang. Apabila daya mekanik lebih besar, maka rotor generator akan mengalami percepatan putaran, dan apabila daya elektrik lebih besar, maka rotor generator akan mengalami perlambatan putaran. Jika hal ini terus terjadi, maka sistem terancam akan kehilangan sinkronisasi dalam sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, agar sistem tetap stabil dan terjaga sinkronisasinya, diperlukan analisis kestabilan sistem tenaga listrik. Upaya untuk mengembalikan sistem ke dalam kondisi stabilnya saat terjadi gangguan disebut periode transien. Kriteria utama stabilitas adalah kemampuan mesin-mesin dalam mempertahankan sinkronisasi pada akhir periode transien. Jika selama periode transien, sistem tenaga memiliki respon osilasi yang mengikuti gangguan teredam menuju kondisi mantap maka sistem dapat dikatakan stabil. Sedangkan jika respon osilasi sistem tenaga tidak mengikuti gangguan teredam menuju kondisi mantap maka sistem tersebut dikatakan tidak stabil

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat dipengaruhi oleh adanya gangguan, baik itu gangguan kecil maupun gangguan besar. Gangguan kecil yang terjadi biasanya disebabkan karena jumlah beban yang terus-menerus mengalami perubahan atau fluktuatif, sedangkan gangguan besar dapat disebabkan karena adanya hubung singkat pada sistem.



Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik [4]

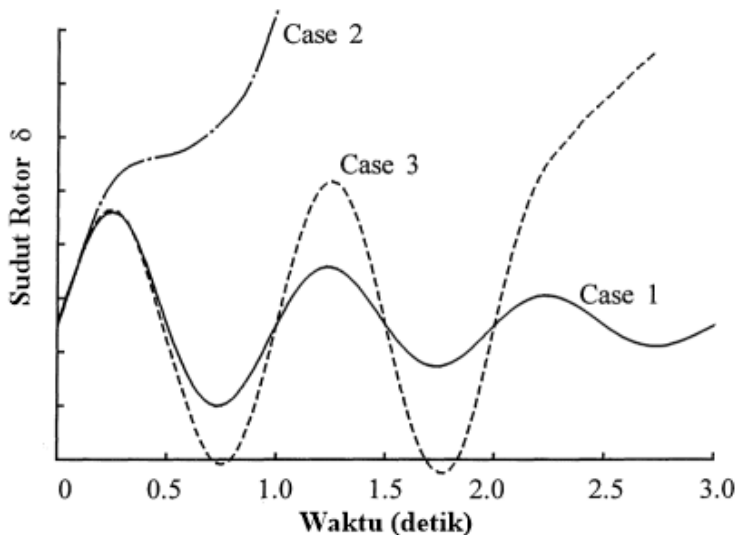
Mengacu pada referensi [4], yaitu *Definition and Classification of Power System Stability*, paper dari *IEEE Transactions on Power Systems*, kestabilan sistem tenaga listrik diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi, dan kestabilan tegangan.

2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor

Dalam suatu sistem tenaga listrik, kestabilan sudut rotor diartikan sebagai kemampuan dari interkoneksi mesin-mesin sinkron yang ada dalam suatu sistem untuk dapat tetap mempertahankan sinkronisasinya setelah terjadi gangguan. Dalam hal ini, masing-masing mesin harus mampu menyeimbangkan torsi mekanik dan torsi elektromagnetik. Apabila mesin tidak mampu menjaga kestabilannya, maka akan terjadi perubahan kecepatan sudut ayunan yang akan menyebabkan generator mengalami hilang sinkronisasi dengan sistem [2]. Parameter sudut rotor adalah hal yang utama untuk diamati, baik saat kestabilan dinamik maupun saat kestabilan transien karena nilai sudut rotor akan mempengaruhi tegangan dan frekuensi.

Kestabilan sudut rotor terbagi menjadi dua, yaitu kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil dan kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil adalah kemampuan suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkronnya setelah adanya gangguan kecil yang terjadi pada suatu sistem. Hal ini dapat dipicu oleh kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya torsi *damping*. Studi kestabilan ini mempunyai kurun waktu antara 10-20 detik setelah gangguan.

Sedangkan kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar adalah kemampuan suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkronnya setelah adanya gangguan besar. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya penyimpangan sudut rotor generator yang besar. Contoh gangguan besar adalah hubung singkat pada sistem. Studi stabilitas transien dapat dianalisis dalam kurun waktu 3-5 detik setelah gangguan. Untuk sistem yang sangat besar dengan ayunan *inter area* yang dominan, maka analisis dapat diperpanjang menjadi kurun waktu 10-20 detik. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil dan kestabilan transien dikategorikan sebagai fenomena jangka pendek.



Gambar 2.2 Respon Sudut Rotor Ketika Terkena Gangguan Transien

Menurut referensi [2], terdapat tiga respon sudut rotor terhadap waktu untuk mesin sinkron pada saat terkena gangguan transien yang dapat dilihat pada gambar 2.2. Respon pertama (*case 1*) menunjukkan respon sudut rotor yang dikatakan stabil. Sudut rotor akan meningkat hingga maksimumnya kemudian amplitudonya turun dan berosilasi hingga mencapai kondisi *steady state*. Pada respon yang kedua (*case 2*), nilai sudut rotor terus mengalami kenaikan pada ayunan pertama sehingga menyebabkan kehilangan sinkronisasi. Penyebab kasus ini adalah kurangnya torsi sinkronisasi. Respon yang ketiga (*case 3*) menunjukkan respon sudut rotor yang stabil pada saat ayunan pertama, namun kemudian mengalami osilasi dan kenaikan amplitudo sehingga menyebabkan sistem menjadi tidak stabil.

2.2.2 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga untuk dapat tetap mempertahankan frekuensinya dalam kondisi stabil saat terjadi gangguan besar. Dalam hal ini, gangguan biasanya berupa perubahan daya beban atau perubahan daya pembangkitan yang

signifikan sehingga menyebabkan tidak tercapainya titik keseimbangan sistem [8].

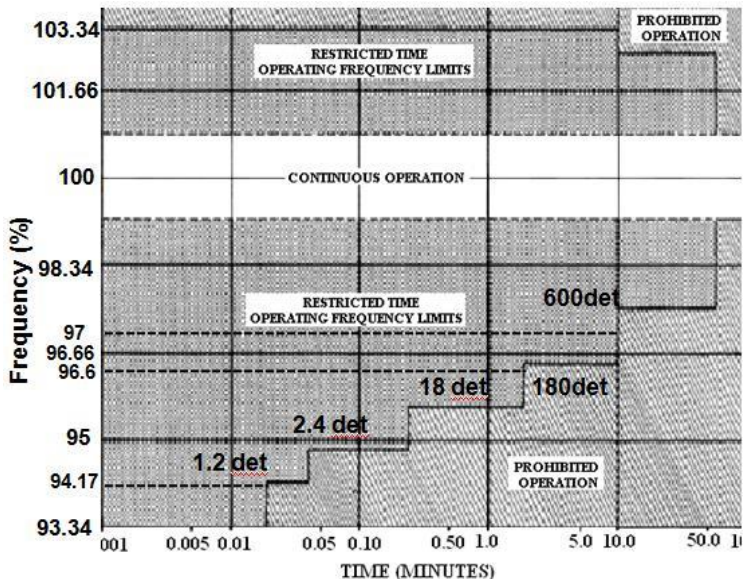
Kestabilan frekuensi terbagi menjadi dua, yaitu kestabilan frekuensi jangka panjang atau lama dan kestabilan frekuensi jangka pendek. Penyebab kestabilan frekuensi jangka panjang biasanya adalah kontrol *governor* yang tidak mampu bekerja saat terjadi gangguan. Kestabilan frekuensi jangka panjang berada dalam rentang waktu antara puluhan detik sampai beberapa menit. Sedangkan kestabilan frekuensi jangka pendek biasanya disebabkan oleh terjadinya perubahan daya beban yang signifikan sehingga generator tidak mampu melayani daya yang dibutuhkan.

Dalam kestabilan frekuensi terdapat tiga kondisi kesetimbangan antara daya pembangkitan dan daya konsumsi atau beban yang mempengaruhi frekuensi sistem, yaitu:

- a. Kondisi pertama menunjukkan keseimbangan sesaat antara daya nyata (MW) pembangkitan dengan daya nyata (MW) yang dikonsumsi beban. Frekuensi bernilai nominal (50 Hz) karena nilai daya nyata pembangkitan sama dengan daya nyata konsumsi beban.
- b. Kondisi kedua menunjukkan nilai frekuensi sistem bernilai diatas 50 Hz ketika daya nyata pembangkitan lebih besar dari daya nyata konsumsi beban. Untuk mengembalikan frekuensi ke nilai nominal, daya nyata pembangkitan dikurangi.
- c. Kondisi ketiga menunjukkan nilai frekuensi yang berada dibawah 50 Hz ketika daya nyata pembangkitan lebih kecil dari daya nyata konsumsi beban. Untuk mengembalikan frekuensi ke nilai nominal, daya nyata pembangkitan ditambah.

Batas operasi frekuensi yang diizinkan terdapat pada IEEE Std. C37.106-2003 [9] yang berisi standar operasi pada *steam turbin generator* dalam frekuensi 60 Hz. Operasi frekuensi yang diizinkan dapat dilihat pada gambar 2.3.

Dalam gambar 2.3 terdapat tiga daerah operasi frekuensi, yaitu *restricted time operating frequency limits*, *prohibited operation*, dan *continous operation*. *Restricted time operating frequency limits* adalah daerah operasi frekuensi yang masih diizinkan, namun hanya bersifat sementara. Semakin besar penurunan frekuensinya maka semakin pendek waktu yang diizinkan frekuensi pada kondisi tersebut. *Prohibited operation* merupakan daerah frekuensi terlarang, sehingga tidak diizinkan operasi frekuensi mencapai daerah tersebut. *Continuous operation* adalah daerah frekuensi normal.



Gambar 2.3 Standar Operasi Frekuensi untuk *Steam Turbin Generator* Menurut IEEE Std. C37.106-2003 [9]

2.2.3 Kestabilan Tegangan

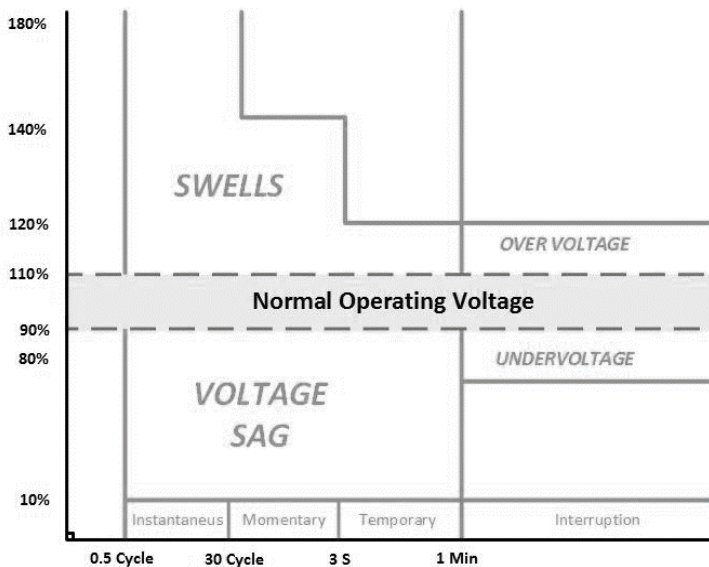
Kestabilan tegangan dapat didefinisikan sebagai kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk dapat tetap mempertahankan nilai tegangan pada semua bus sistem untuk tetap stabil setelah terjadi gangguan. Hal ini bergantung pada kemampuan sistem untuk dapat bertahan pada kesetimbangan antara *supply* daya pembangkit dan kebutuhan beban. Gangguan yang dapat mempengaruhi kestabilan tegangan yaitu adanya generator yang lepas sinkron dari sistem atau lepasnya beban besar secara mendadak.

Gangguan kestabilan tegangan terbagi menjadi dua, yaitu kestabilan tegangan gangguan besar dan kestabilan tegangan gangguan kecil dalam jangka panjang dan jangka pendek [4]. Kestabilan tegangan gangguan besar adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk menjaga nilai tegangan *steady* tetap stabil setelah mengalami gangguan besar seperti lepasnya generator dan hubung singkat. Kestabilan tegangan gangguan kecil yaitu

kemampuan untuk mempertahankan nilai tegangan sistem tenaga listrik ketika terjadi gangguan kecil seperti terjadi perubahan beban kecil.

Gangguan kestabilan tegangan jangka pendek memiliki durasi antara 0,5 *cycle* sampai satu menit. Contoh paling umum adalah *voltage sags* dan *voltage swells*. Sedangkan gangguan kestabilan tegangan jangka panjang biasanya terjadi lebih dari satu menit, seperti terjadinya tegangan kurang atau *undervoltage* dan tegangan lebih atau *overvoltage* pada sistem. Tegangan lebih adalah peningkatan nilai efektif tegangan hingga melebihi 110% dari tegangan nominal ketika melebihi satu menit. Tegangan kurang adalah penurunan nilai efektif tegangan hingga melebihi 90% dari tegangan nominal ketika melebihi satu menit.

Pengoperasian nilai tegangan memakai dua standar. Untuk kedip tegangan, dipakai standar IEEE 1159-1995 [10]. Gambar 2.4 menunjukkan bahwa batas kedip tegangan yang diizinkan dalam operasi tegangan adalah 10%. Untuk *instantaneous* selama 30 *cycle*, untuk *momentary* selama 3 detik, dan untuk *temporary* selama 1 menit.



Gambar 2.4 Kategori Fenomena Tegangan Tenaga Listrik Menurut IEEE 1159-1995 [10]

Ketika tegangan pada sistem stabil, maka standar operasi tegangan yang dipakai adalah standar PLN, yaitu:

- 500 kV + 5%, -5%
- 150 kV + 5%, -10%
- 70 kV + 5%, -10%
- 20 kV + 5%, -10%

2.3 Kestabilan Transien

Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk dapat tetap bertahan pada kondisi setimbang saat terkena gangguan transien. Dalam hal ini, parameter yang perlu diperhatikan adalah respon sudut rotor generator saat gangguan besar secara tiba-tiba pada suatu sistem [6]. Analisis mengenai kestabilan transien (*Transient Stability Assessment*) merupakan hal yang penting. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem untuk dapat kembali ke kondisi stabil atau setimbang saat terjadi gangguan transien [6]. Suatu sistem tenaga listrik dapat dikatakan stabil saat kondisi *steady state*, namun belum tentu sistem tersebut dapat stabil pada saat keadaan transien.

Saat terjadi gangguan, output daya dari generator berkurang. Akibatnya, jumlah daya input mekanik dan daya output elektrik mengalami perbedaan. Besar sudut rotor generator akan bertambah seiring dengan putaran rotor generator yang mengalami percepatan. Ketika gangguan hilang, daya output generator akan kembali pulih. Setelah gangguan hilang atau teratasi, output daya dari generator akan bertambah melebihi dari daya input mekanik. Akibatnya, putaran rotor generator mengalami perlambatan. Jika pada keadaan ini terdapat torsi lawan yang besarnya cukup untuk mengimbangi percepatan ketika terjadi gangguan pada sistem, maka dalam ayunan pertama sistem akan stabil. Jika tidak, maka sistem berpotensi kehilangan sinkron akibat sudut rotor generator yang bertambah besar.

Kestabilan transien dapat ditandai oleh adanya gangguan yang dipertahankan dalam waktu singkat. Hal ini menyebabkan berkurangnya tegangan terminal mesin dan kemampuan transfer daya. Pada sistem *single machine infinite bus* dapat dihitung estimasi kemampuan transfer daya dengan persamaan (2.1) berikut:

$$P = \frac{V_t V_\infty}{X} \sin \delta \quad (2.1)$$

Dimana simbol-simbol tersebut mempunyai arti:

V_t : Tegangan terminal mesin (*Volt*)

V_∞ : Tegangan infinite bus (*Volt*)

Tegangan terminal mesin V_t berbanding lurus dengan transfer daya P , sehingga jika nilai V_t berkurang, maka nilai P juga akan mengalami penurunan. Diperlukan aksi yang sangat cepat pada sistem eksitasi dalam memberikan eksitasi pada kumparan medan agar dapat mencegah penurunan nilai P . Maka dari itu, nilai V_t akan dipertahankan pada nilai efektifnya. Perubahan yang cepat juga diperlukan pada eksitasi ketika reaktansi X bertambah pada peristiwa pemutusan atau *switching*.

Beberapa faktor yang dapat memicu terjadinya gangguan transien, antara lain adalah peristiwa lepasnya generator dari sistem (*generator outage*), adanya gangguan hubung singkat (*short circuit*), *starting* motor-motor besar pada sistem, atau lepasnya beban besar secara tiba-tiba.

2.3.1 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat atau *short circuit* merupakan gangguan yang paling sering muncul dalam satu sistem tenaga listrik. Gangguan hubung singkat ini dapat disebabkan karena adanya sambaran petir, kegagalan isolasi peralatan, gangguan binatang, dan ranting pohon. Ketika terjadi hubung singkat, titik terjadinya gangguan akan menerima arus kontribusi yang bernilai sangat besar sehingga tegangan di sekitar titik gangguan akan menurun secara signifikan. Semakin besar arus hubung singkat maka semakin rendah tegangan di sekitar titik gangguan. Hal ini akan mengakibatkan terganggunya kestabilan sistem. Selain itu, gangguan hubung singkat dapat berpotensi merusak peralatan karena nilai arus yang sangat besar yang mengalir ke dalam peralatan.

2.3.2 Motor Starting

Pada saat melakukan penyalan motor atau *starting* motor, akan terdapat arus yang sangat tinggi dan besarnya berkali-kali dari arus nominalnya. Arus ini biasa disebut dengan istilah *locked rotor current* (*LRC*) yang nilainya bervariasi pada tiap motor tergantung spesifikasi atau nilai *rating*-nya. Arus starting motor yang sangat besar ini dapat mengakibatkan drop tegangan pada sistem. Selain itu, arus starting yang besar juga dapat mengakibatkan bertambahnya rugi-rugi daya aktif pada saluran sehingga dapat menurunkan frekuensi generator. Drop tegangan

dan turunnya frekuensi generator akibat starting motor ini akan mengakibatkan terganggunya kestabilan pada suatu sistem.

2.3.3 Penambahan Beban Secara Tiba-Tiba

Gangguan transien dapat ditimbulkan karena adanya penambahan beban pada suatu sistem tenaga apabila jumlah beban melebihi batas kestabilan *steady state* atau apabila adanya kenaikan beban hingga terjadi osilasi, sehingga pada sistem akan terjadi ayunan yang melebihi titik kritis dan tidak dapat kembali ke kondisi stabil.

Ketika suatu sistem tenaga listrik diberikan pembebanan dengan beban penuh secara tiba-tiba, maka arus yang diperlukan sangat besar untuk memenuhi kebutuhan. Akibatnya, frekuensi sistem akan turun dengan cepat. Pada kondisi demikian sistem berpotensi keluar dari keadaan sinkronnya walaupun besar beban belum mencapai batas kestabilan mantap yaitu daya maksimumnya. Hal ini dikarenakan daya keluar elektrik generator jauh melampaui daya masukan mekanis generator atau daya yang dihasilkan penggerak mula (*prime mover*), dan kekurangan ini disuplai dengan berkurangnya energi kinetis generator. Sehingga putaran rotor generator melambat atau frekuensi sistem turun, sudut daya δ bertambah besar dan melampaui sudut kritisnya, akibatnya generator akan lepas sinkron atau tidak stabil. Sesaat dilakukannya pembebanan tersebut, rotor generator akan mengalami ayunan dan getaran yang besar.

2.4 Persamaan Ayunan

Pada mesin-mesin sinkron, gerakan atau putaran rotornya diatur oleh suatu persamaan yang menganut prinsip dasar dinamika, yaitu besar momen putar percepatan (*accelerating torque*) ialah hasil operasi perkalian dari percepatan sudut dengan momen inersia atau momen kelembaman rotor [11]. Persamaan generator sinkron dapat direpresentasikan dalam persamaan (2.2) berikut:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.2)$$

Dimana simbol-simbol tersebut mempunyai arti:

- J : Momen inersia total dari massa rotor ($kg\cdot m^2$)
 θ_m : Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam dalam radian mekanis (rad)
 t : Waktu (s)
 T_a : Momen putar kecepatan percepatan bersih ($N\cdot m$)
 T_m : Momen putar mekanis atau poros penggerak yang diberikan oleh *prime mover* dikurangi dengan momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran ($N\cdot m$)
 T_e : Momen putar listrik atau elektromagnetik ($N\cdot m$)

Saat berada dalam kondisi normal atau generator berada dalam keadaan sinkron dengan mesin-mesin lainnya, Nilai T_a bernilai nol, karena nilai T_m dan T_e adalah bernilai sama. Massa yang berputar, yaitu rotor generator dan *prime mover*, berada dalam kondisi sinkronnya dan menghasilkan kecepatan konstan. Sehingga, dalam keadaan ini tidak timbul percepatan maupun perlambatan putaran rotor. Sistem akan berputar pada kecepatan sinkron. Pada generator sinkron, momen putar mekanis (T_m) dan momen putar listrik (T_e) dianggap bernilai positif. Apabila momen putar mekanis lebih besar dari momen putar listrik, maka T_a bernilai positif, sehingga putaran rotor generator akan timbul percepatan karena dirasa bebannya semakin ringan. Sebaliknya, apabila momen putar listrik yang lebih besar dari momen putar mekanis, maka T_a bernilai negatif, sehingga putaran rotor generator akan melambat karena dirasa menanggung beban yang lebih besar.

2.5 Waktu Pemutusan Kritis (*Critical Clearing Time*)

Critical Clearing Time merupakan perhitungan batas waktu pemutusan kritis setelah terjadi gangguan. Dengan kata lain, agar sistem dapat kembali stabil, maka saat terjadi gangguan sistem harus diputus sebelum waktu CCT [3], [4]. Salah satu cara untuk mendapatkan nilai CCT adalah dengan menggunakan *Time Domain Simulation method* (TDS) [5]. Ketika terjadi gangguan dalam suatu sistem tenaga listrik, rele pengaman akan mendeteksi gangguan dan mentrigger *circuit breaker* untuk bekerja dalam waktu tertentu untuk mengisolir gangguan, namun hal ini tidak menjamin sistem masih berada dalam kondisi stabil setelah adanya gangguan.

Oleh karena itu, agar generator dapat tetap berada dalam kondisi stabil dan tidak mengalami lepas sinkron dari sistem, maka waktu pemutusan gangguan harus memperhatikan nilai dari *CCT*. Saat terjadi gangguan, generator akan tetap dapat stabil apabila gangguan diputus sebelum waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*). Namun, apabila gangguannya diputus setelah melewati perhitungan nilai batas waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*), maka generator berpotensi lepas sinkron dari sistem dikarenakan generator berada dalam kondisi yang tidak stabil.

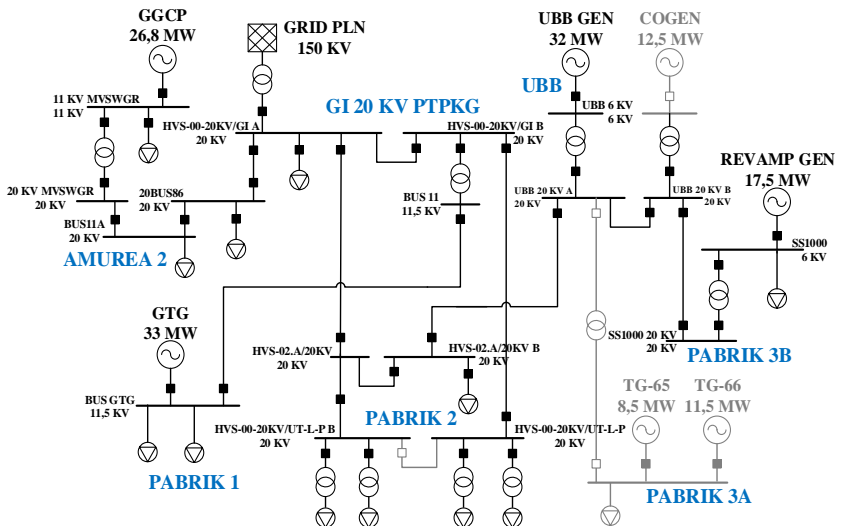
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

SISTEM KELISTRIKAN PT. PETROKIMIA GRESIK

3.1 Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik

PT. Petrokimia Gresik merupakan salah satu produsen pupuk terbesar di Indonesia yang berlokasi di Kabupaten Gresik, Provinsi Jawa Timur. PT. Petrokimia Gresik mempunyai jaringan sistem kelistrikan yang terbilang cukup besar dan kompleks. Pada PT. Petrokimia Gresik, terdapat lima area pabrik, yaitu Pabrik 1, Pabrik 2, Pabrik 3A, Pabrik 3B, dan area Amurea 2 yang baru ditambahkan pada proyek *Independent Power Producer* (IPP). Sistem kelistrikannya menggunakan konfigurasi semi-radial, dimana hampir semua area pabrik PT. Petrokimia Gresik telah terintegrasi antara satu pembangkit dengan pembangkit yang lainnya, kecuali untuk area Pabrik 3A yang dalam kondisi normalnya beroperasi *islanding* atau beroperasi secara mandiri dengan suplai daya yang dilayani oleh generator TG-65 dan TG-66 dengan daya mampu masing-masing sebesar 8,5 MW dan 11,5 MW. Sistem kelistrikan di PT. Petrokimia Gresik dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik

Total beban pada sistem kelistrikan di PT. Petrokimia Gresik dalam kondisi operasi normal adalah sekitar 77 MW. Beban ini disuplai oleh beberapa pembangkit yang aktif, diantaranya pembangkit GGCP dengan daya mampu 23 MW, GTG dengan daya mampu 24 MW, UBB dengan daya mampu 15 MW, dan Revamp Gen dengan daya mampu 12 MW. Selain itu, sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik juga telah dilakukan interkoneksi dengan grid PLN dengan kontrak daya sebesar 20 MVA.

3.2 Pembangkitan, Pembebanan, dan *Demand* Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik

Dalam kondisi operasi normal, jumlah total *demand* pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik saat ini sebesar 76.688 MW, 40.757 Mvar, dan 86.846 MVA. Untuk rincian pembangkitan, pembebanan, dan *demand* dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rangkuman Jumlah Pembangkitan, Pembebanan, dan *Demand*

Keterangan	MW	MvAr	MVA	%PF
Sumber (<i>Swing Buses</i>)	12,488	1,518	12,580	99,27 lag
Sumber (<i>Non-Swing Buses</i>)	64,200	39,240	75,242	85,32 lag
Total <i>Demand</i>	76,688	40,757	86,846	88,30 lag
Total <i>Motor Load</i>	63,995	34,881	72,884	87,80 lag
Total <i>Static Load</i>	11,475	0,351	11,481	99,95 lag
<i>Apparent Losses</i>	1,217	5,525		

3.3 Kapasitas Pembangkit di PT. Petrokimia Gresik

Dalam memenuhi kebutuhan beban, sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik mengandalkan suplai daya dari generator-generator yang dimilikinya dan juga suplai daya dari jaringan PLN. Terdapat empat generator aktif yang menyuplai sistem dalam keadaan normal. Data kapasitas pembangkit untuk masing-masing unit generator dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data Kapasitas Pembangkit di PT. Petrokimia Gresik

Spesifikasi	GGCP	GTG	UBB	Revamp Gen
Rating Kapasitas	26.8 MW	33 MW	32 MW	17.5 MW
Daya Mampu	22 MW	24 MW	15 MW	12 MW
Tegangan	11 kV	11.5 kV	6 kV	6 kV
Frekuensi	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
%PF	85%	80%	80%	85%
FLA	1655 A	2071 A	3849 A	1981 A
RPM	1500	3000	3000	3000
H	1.481	4	4	3.2
Tipe Exciter	DC1	DC1	AC5A	ST1
Tipe Governor	GT	GGOV3	505	ST
<i>Direct axis synchronous reactance (X_d)</i>	198.2	155	155	155
<i>Direct axis transient reactance (X_d')</i>	24.5	28	28	28
<i>Direct axis sub-transient reactance (X_d'')</i>	17.3	19	19	19
<i>Negative sequence reactance (X_2)</i>	17.9	18	18	18
<i>Zero sequence reactance (X_0)</i>	11.2	7	9	7
<i>Quadrature axis synchronous reactance (X_q)</i>	102.1	155	155	155
<i>Quadrature axis transient reactance (X_q')</i>	102.1	65	65	65
<i>Quadrature axis sub-transient reactance (X_q'')</i>	24.2	19	19	19
<i>Transient direct axis open circuit transient (T_{do}')</i>	7.58	6.5	6.5	6.5
<i>Transient direct axis open circuit transient (T_{do}'')</i>	0.046	0.035	0.035	0.035

3.4 Sistem Distribusi di PT. Petrokimia Gresik

Dalam pendistribusian tenaga listriknya, PT. Petrokimia Gresik menggunakan jaringan semi-radial. Jaringan kelistrikan PT. Petrokimia Gresik bukan merupakan jaringan radial murni dikarenakan hampir semua pabrik telah terinterkoneksi dan tersuplai lebih dari satu sumber daya, kecuali untuk area Pabrik 3A yang dalam kondisi normalnya beroperasi *islanding* atau beroperasi secara mandiri dengan mengandalkan suplai daya dari generator TG-65 sebesar 8,5 MW dan generator TG-66 sebesar 11,5 MW.

Sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik memiliki beberapa nilai tegangan yang berbeda dalam distribusi tenaga listriknya, diantaranya adalah 20 kV, 11.5 kV, 11 kV, 6.3 kV, 6 kV, dan 0.4 kV. Untuk menghubungkan jaringan kelistrikan tersebut, PT. Petrokimia Gresik menggunakan trafo *step-up* dan trafo *step-down*. Data untuk masing-masing trafo yang digunakan oleh PT. Petrokimia Gresik dapat dilihat pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Data Tranformator pada PT. Petrokimia Gresik

ID Trafo	MVA	kV	%Z	X/R	Hubungan
IT	30	11/20	11	1.5	delta/wye
AUT	3	11/6	11	6	wye/delta
TR1	12.5	20/6.3	7.5	13	delta/wye
TR2	12.5	20/6.3	7.5	13	delta/wye
TR5	1.25	6.3/0.4	4.5	3.5	delta/wye
TR7	1.6	6.3/0.4	5.5	10	delta/wye
TR9	3	6.3/0.4	7	10	delta/wye
TR10	3	6.3/0.4	7	10	delta/wye
TR8	1.6	6.3/0.4	5.5	10	delta/wye
TR6	1.25	6.3/0.4	4.5	3.5	delta/wye
TR PLN	25	150/20	10	23.7	delta/wye
TR HVS-2210	2.5	20/6	6	10.67	delta/wye
TR GI	25	20/11.5	6	23.7	delta/wye
TR-2281 A	25	11.5/6	8	23.7	delta/wye
TR-2281 B	25	11.5/6	8	23.7	delta/wye
09-TR-101	5	20/6	7	12.14	delta/wye
TR 13	16	20/6	8.33	18.6	delta/wye
TR 11	8	20/6	8	14.23	delta/wye
TR 12	8	20/6	8.33	14.23	delta/wye

Tabel 3.3 Data Tranformator pada PT. Petrokimia Gresik (lanjutan)

ID Trafo	MVA	kV	%Z	X/R	Hubungan
TR 14	8	20/6	8.33	14.23	delta/wye
TR 15	16	20/6	8.33	18.6	delta/wye
32-TR-31	8	20/6	8	15.5	delta/wye
TRAFO UBB	35	6/20	10	27.3	delta/wye
T21	20	6/20	8	18.6	delta/wye
MAIN01	8	10/6	8	14.23	delta/wye

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS DATA

4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik

Pemodelan sistem kelistrikan pada PT. Petrokimia Gresik dilakukan menggunakan *software* ETAP 12.6.0 dengan *menggambarkan single line diagram* berdasarkan data-data kelistrikan PT. Petrokimia Gresik yang telah diperoleh. Pemodelan sistem kelistrikan ini bertujuan untuk mengetahui kondisi eksisting kelistrikan perusahaan.

Setelah melakukan pemodelan, maka selanjutnya akan dilakukan simulasi analisis kestabilan transien dengan melihat respon sudut rotor generator saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa untuk memperoleh nilai *CCT*. Nilai *CCT* yang didapatkan akan dibandingkan dengan *setting* waktu rele pengaman eksisting perusahaan. *Setting* waktu rele yang nilainya berada di atas nilai *CCT* akan dilakukan perbaikan *setting* waktu rele dengan mempertimbangkan nilai *CCT* sehingga diharapkan dapat menambah kestabilan sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik ketika terjadi gangguan.

4.2 Studi Kasus Kestabilan Transien

Pada simulasi ini akan dilakukan analisis kestabilan transien dengan melihat respon sudut rotor generator saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa pada beberapa bus yang telah dipilih untuk memperoleh nilai *CCT*. Langkah-langkah yang akan dilakukan pada simulasi Tugas Akhir ini antara lain:

- i. Memberi event gangguan hubung singkat tiga fasa pada bus yang dipilih pada detik $t = 1s$.
- ii. Melihat respon sudut rotor generator ketika gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka dan menentukan waktu *CCT* pada bus tersebut.
- iii. Membandingkan hasil nilai *CCT* yang telah didapatkan dengan *setting* waktu rele pengaman eksisting perusahaan yang belum mempertimbangkan analisis kestabilan transien.
- iv. Menentukan bus mana saja yang nilai *setting* waktunya masih di atas nilai *CCT*. *Setting* waktu rele yang nilainya berada di atas nilai *CCT* akan dilakukan perbaikan *setting* waktu rele dengan mempertimbangkan analisis kestabilan transien.

- v. Melakukan pengecekan kembali *setting* waktu rele dengan mempertimbangkan analisis kestabilan transien. Dengan nilai *setting* waktu rele yang baru diharapkan sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik dapat lebih stabil.

Dalam Tugas Akhir ini, analisis kestabilan transien dilakukan pada bagian jaringan interkoneksi tegangan menengah sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik. Beberapa bus yang akan dianalisis dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Bus yang Akan Dilakukan Analisis Kestabilan Transien

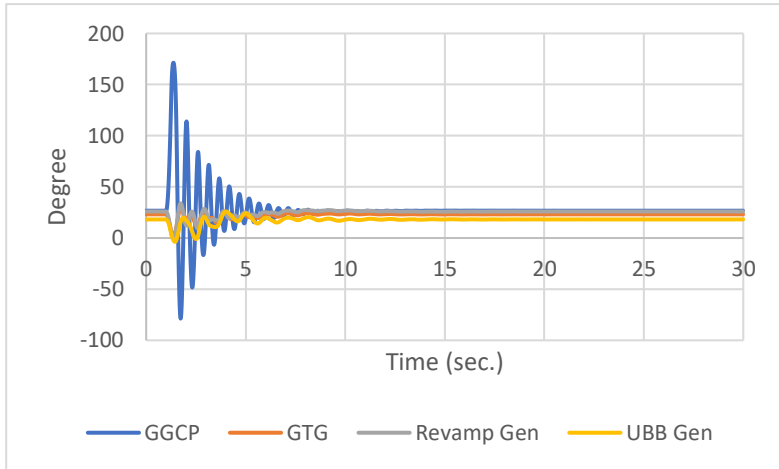
No.	Bus ID	Level Tegangan	Lokasi
1	11 KV MVSWGR	11 kV	Amurea 2
2	20 KV MVSWGR	20 kV	Amurea 2
3	BUS11A	20 kV	Amurea 2
4	20BUS86	20 kV	Amurea 2
5	HVS-00-20KV/GI A	20 kV	GI PT. PKG
6	HVS-00-20KV/GI B	20 kV	GI PT. PKG
7	UBB 6 KV	6 kV	UBB
8	UBB 20 KV A	20 kV	UBB
9	UBB 20 KV B	20 kV	UBB
10	BUS 11	11.5 kV	GI PT. PKG
11	BUS GTG	11.5 kV	Pabrik 1
12	HVS-02.A/20KV	20 kV	Pabrik 2
13	HVS-02.A/20KV B	20 kV	Pabrik 2
14	HVS-00-20KV/UT-L-P B	20 kV	Pabrik 2
15	HVS-00-20KV/UT-L-P	20 kV	Pabrik 2
16	SS1000	6 kV	Pabrik 3B
17	SS1000 20 KV	20 kV	Pabrik 3B

4.3 Hasil Simulasi Kestabilan Transien dan Penentuan Nilai *Critical Clearing Time (CCT)*

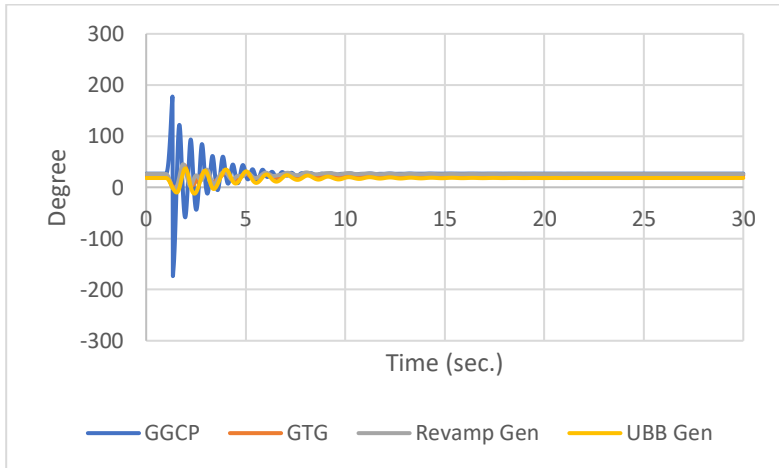
Pada sub bab ini akan dijelaskan hasil simulasi dan analisis dari penentuan nilai *CCT* pada setiap kasus yang diamati dengan *Time Domain Simulation method* menggunakan *software* ETAP 12.6.0. Dalam simulasi ini akan diamati perubahan sudut rotor pada setiap generator ketika terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa. *Event* yang digunakan untuk mengisolir gangguan pada Tugas Akhir ini yaitu *circuit breaker open* untuk bus yang jauh dari generator dan *clearing fault* untuk bus yang dekat dengan generator. Hal ini bertujuan agar tetap dapat mengamati perilaku generator setelah gangguan terisolir mengingat *plant* yang diamati menggunakan *single* saluran. Nilai *CCT* didapatkan dengan cara *trial* dan *error* dari waktu pemutusan *circuit breaker* sehingga didapatkan *range* waktu stabil dan waktu tidak stabil dari sudut rotor generator.

4.3.1 Studi Kasus 1: *CCT* pada bus 11 KV MVSWGR

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus 11 KV MVSWGR dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu *CCT*. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai *CCT* berada pada waktu 0,25s – 0,26s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,25 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,26 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 1 ini dapat dilihat pada gambar 4.1 dan gambar 4.2.



Gambar 4.1 Respon sudut rotor studi kasus 1 waktu pemutusan 0,25 s



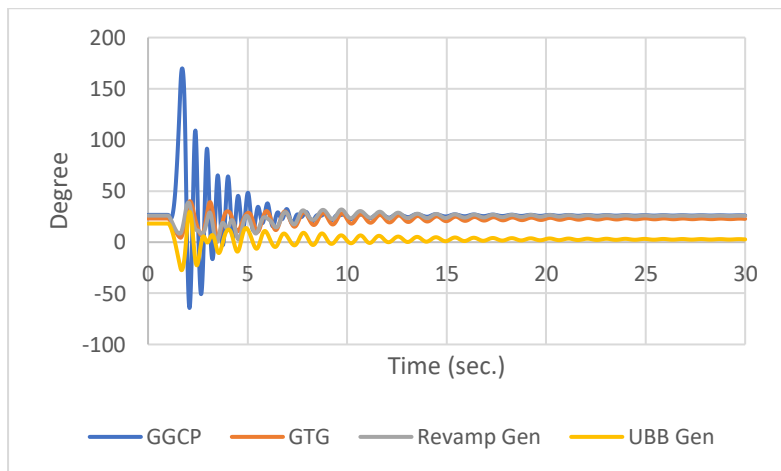
Gambar 4.2 Respon sudut rotor studi kasus 1 waktu pemutusan 0,26 s

Dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,25 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.2 saat gangguan diputus pada waktu 0,26 detik,

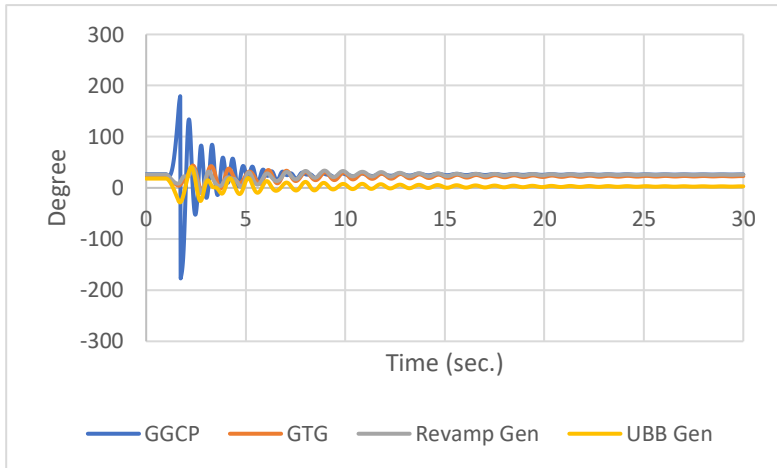
sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada generator GGCP yang mengayun dalam kondisi yang kritis dari sudut $177,46^\circ$ menuju sudut $-173,65^\circ$. Dalam hal ini, generator GGCP dapat dikatakan telah mengalami *step-out* atau lepas sinkron dari sistem.

4.3.2 Studi Kasus 2: CCT pada bus 20 KV MVSWGR

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus 20 KV MVSWGR dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu *CCT*. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai *CCT* berada pada waktu 0,62s – 0,63s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,62 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,63 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 2 ini dapat dilihat pada gambar 4.3 dan gambar 4.4.



Gambar 4.3 Respon sudut rotor studi kasus 2 waktu pemutusan 0,62 s

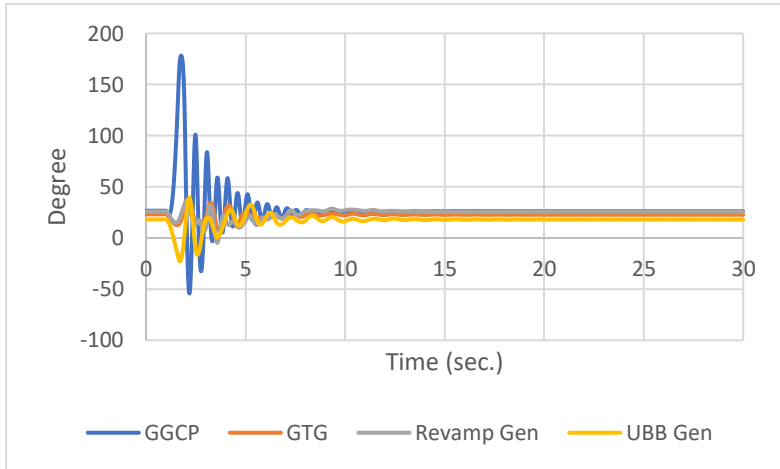


Gambar 4.4 Respon sudut rotor studi kasus 2 waktu pemutusan 0,63 s

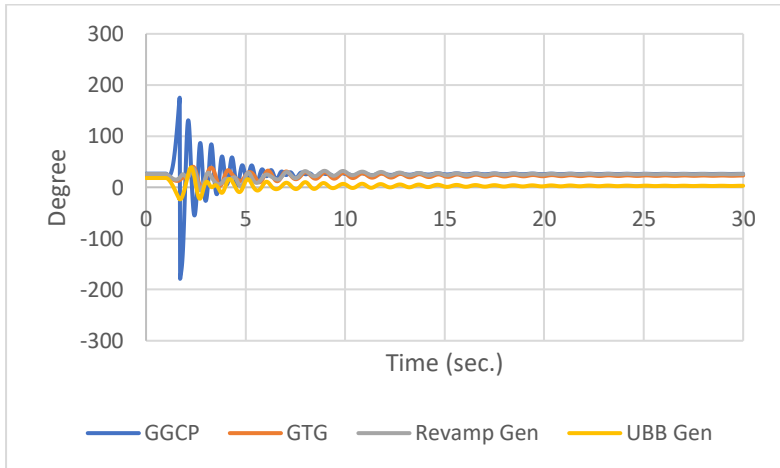
Dari gambar 4.3 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,62 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.4 saat gangguan diputus pada waktu 0,63 detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada generator GGCP yang mengayun dalam kondisi yang kritis dari sudut $179,31^\circ$ menuju sudut $-177,02^\circ$. Dalam hal ini, generator GGCP dapat dikatakan telah mengalami *step-out* atau lepas sinkron dari sistem.

4.3.3 Studi Kasus 3: CCT pada BUS11A

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubungan singkat tiga fasa pada BUS11A dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 0,64s – 0,65s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,64 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,65 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 3 ini dapat dilihat pada gambar 4.5 dan gambar 4.6.



Gambar 4.5 Respon sudut rotor studi kasus 3 waktu pemutusan 0,64 s



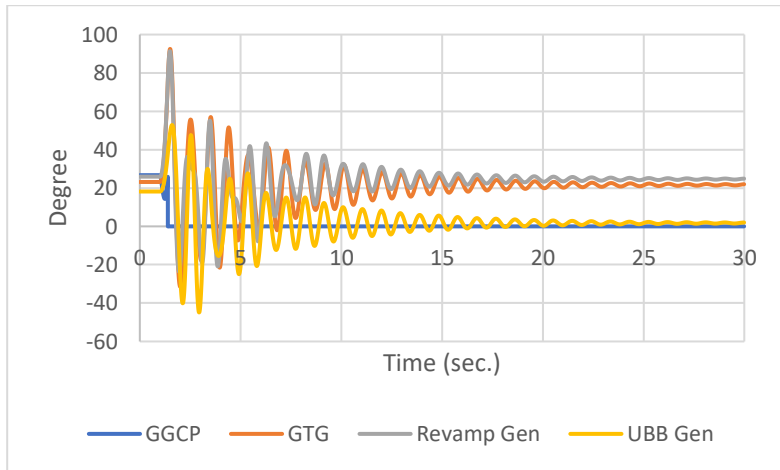
Gambar 4.6 Respon sudut rotor studi kasus 3 waktu pemutusan 0,65 s

Dari gambar 4.5 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,64 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.6 saat gangguan diputus pada waktu 0,65 detik,

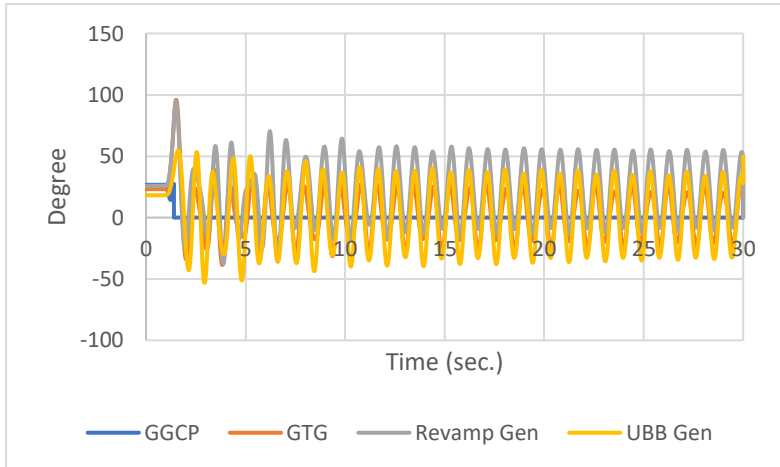
sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada generator GGCP yang mengayun dalam kondisi yang kritis dari sudut $175,29^\circ$ menuju sudut $-178,99^\circ$. Dalam hal ini, generator GGCP dapat dikatakan telah mengalami *step-out* atau lepas sinkron dari sistem.

4.3.4 Studi Kasus 4: CCT pada bus 20BUS86

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus 20BUS86 dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 0,39s – 0,40s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,39 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,40 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 4 ini dapat dilihat pada gambar 4.7 dan gambar 4.8.



Gambar 4.7 Respon sudut rotor studi kasus 4 waktu pemutusan 0,39 s

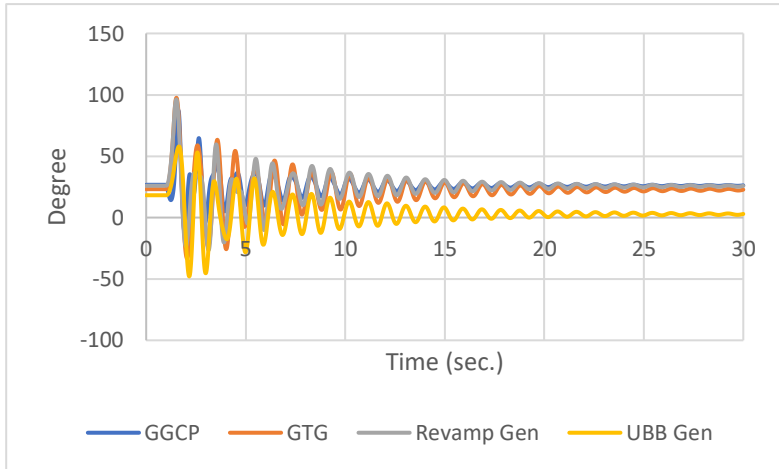


Gambar 4.8 Respon sudut rotor studi kasus 4 waktu pemutusan 0,40 s

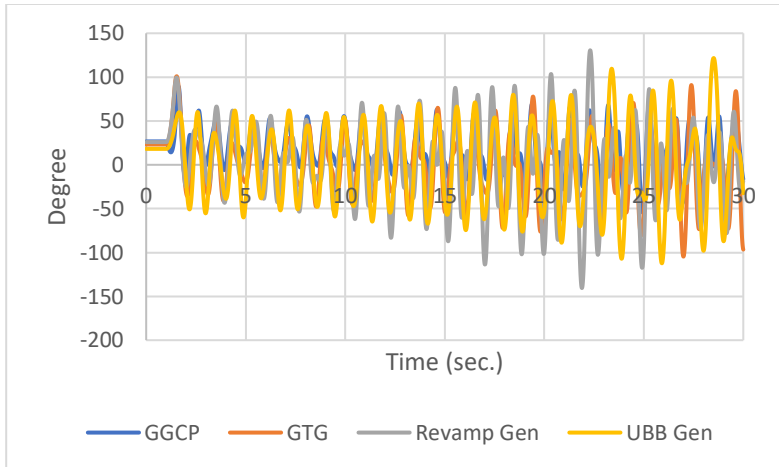
Dari gambar 4.7 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,39 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.8 saat gangguan diputus pada waktu 0,40 detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus.

4.3.5 Studi Kasus 5: CCT pada bus HVS-00-20KV/GI A

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus HVS-00-20KV/GI A dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 0,40s – 0,41s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,40 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,41 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 5 ini dapat dilihat pada gambar 4.9 dan gambar 4.10.



Gambar 4.9 Respon sudut rotor studi kasus 5 waktu pemutusan 0,40 s



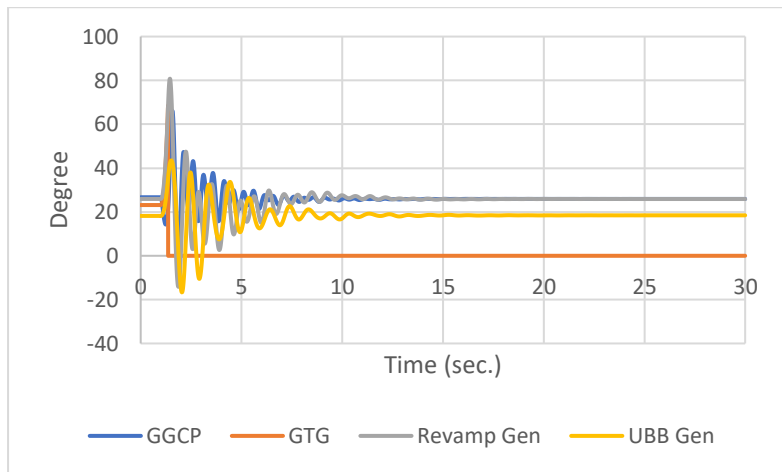
Gambar 4.10 Respon sudut rotor studi kasus 5 waktu pemutusan 0,41 s

Dari gambar 4.9 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,40 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.10 saat gangguan diputus pada waktu 0,41

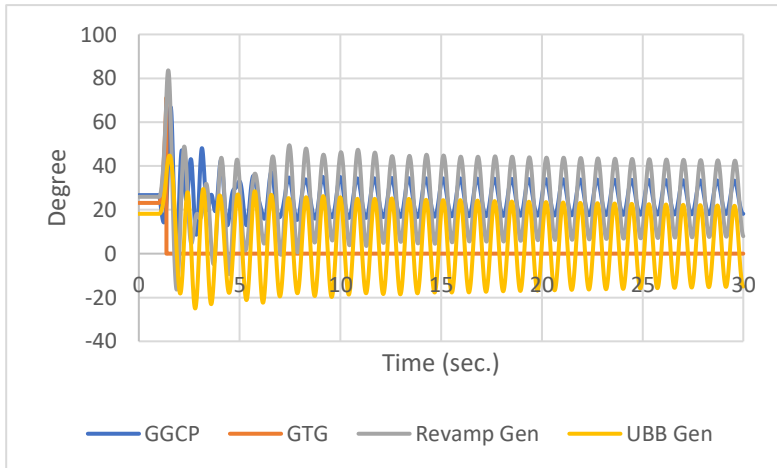
detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada semua generator mulai dari generator GGCP, generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus.

4.3.6 Studi Kasus 6: CCT pada bus HVS-00-20KV/GI B

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus HVS-00-20KV/GI B dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 0,36s – 0,37s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,36 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,37 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 6 ini dapat dilihat pada gambar 4.11 dan gambar 4.12.



Gambar 4.11 Respon sudut rotor studi kasus 6 waktu pemutusan 0,36 s

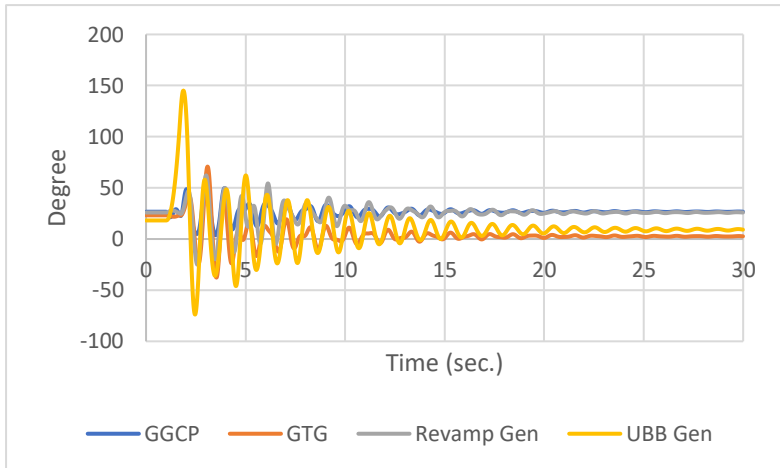


Gambar 4.12 Respon sudut rotor studi kasus 6 waktu pemutusan 0,37 s

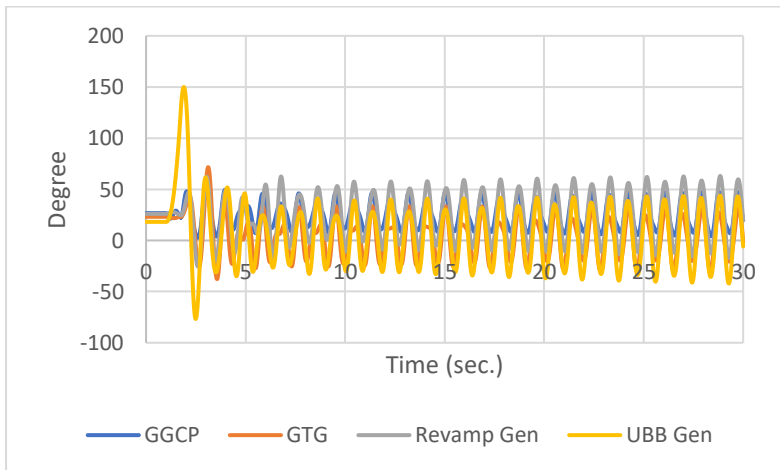
Dari gambar 4.11 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,36 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.12 saat gangguan diputus pada waktu 0,37 detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada generator GGCP, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus.

4.3.7 Studi Kasus 7: CCT pada bus UBB 6 KV

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus UBB 6 KV dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 0,73s – 0,74s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,73 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,74 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 7 ini dapat dilihat pada gambar 4.13 dan gambar 4.14.



Gambar 4.13 Respon sudut rotor studi kasus 7 waktu pemutusan 0,73 s



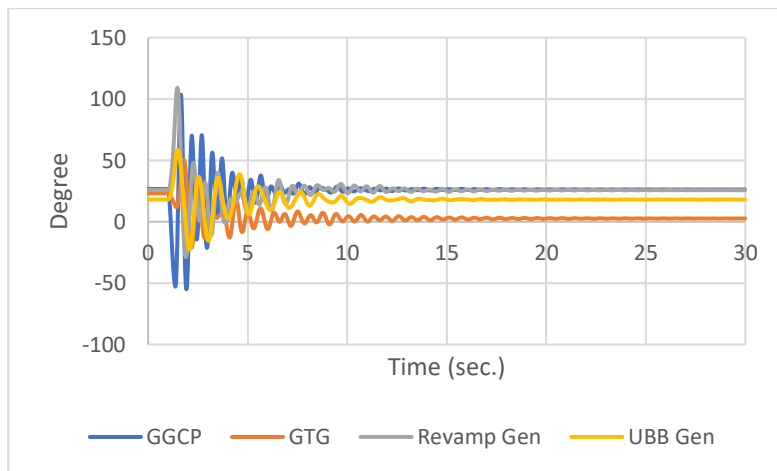
Gambar 4.14 Respon sudut rotor studi kasus 7 waktu pemutusan 0,74 s

Dari gambar 4.13 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,73 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.14 saat gangguan diputus pada waktu 0,74

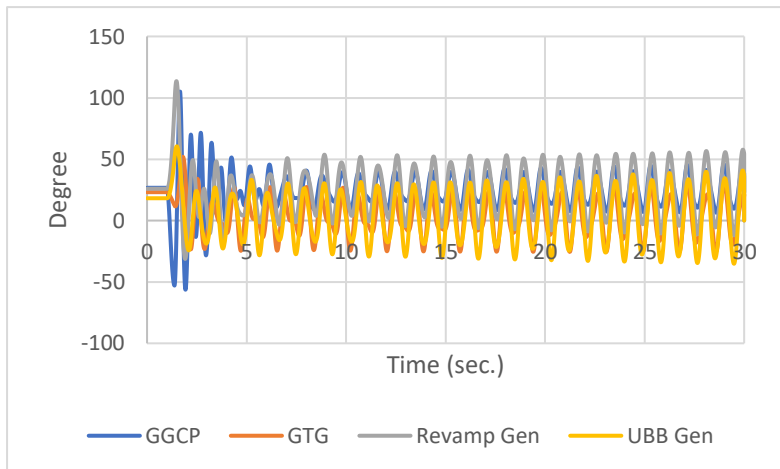
detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada semua generator mulai dari generator GGCP, generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus.

4.3.8 Studi Kasus 8: CCT pada bus UBB 20 KV A

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus UBB 20 KV A dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 0,37s – 0,38s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,37 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,38 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 8 ini dapat dilihat pada gambar 4.15 dan gambar 4.16.



Gambar 4.15 Respon sudut rotor studi kasus 8 waktu pemutusan 0,37 s

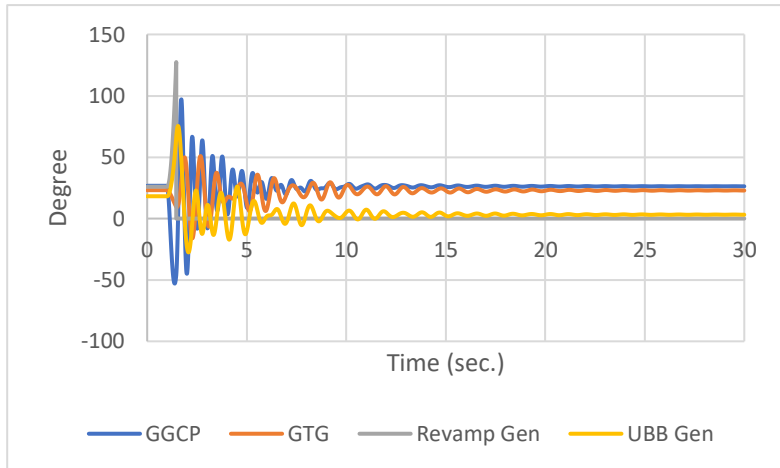


Gambar 4.16 Respon sudut rotor studi kasus 8 waktu pemutusan 0,38 s

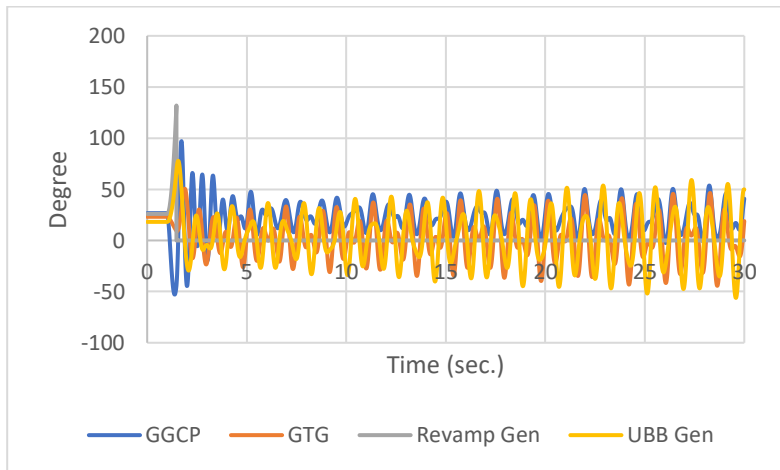
Dari gambar 4.15 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,37 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.16 saat gangguan diputus pada waktu 0,38 detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada semua generator mulai dari generator GGCP, generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus.

4.3.9 Studi Kasus 9: CCT pada bus UBB 20 KV B

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus UBB 20 KV B dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 0,46s – 0,47s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,46 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,47 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 9 ini dapat dilihat pada gambar 4.17 dan gambar 4.18.



Gambar 4.17 Respon sudut rotor studi kasus 9 waktu pemutusan 0,46 s



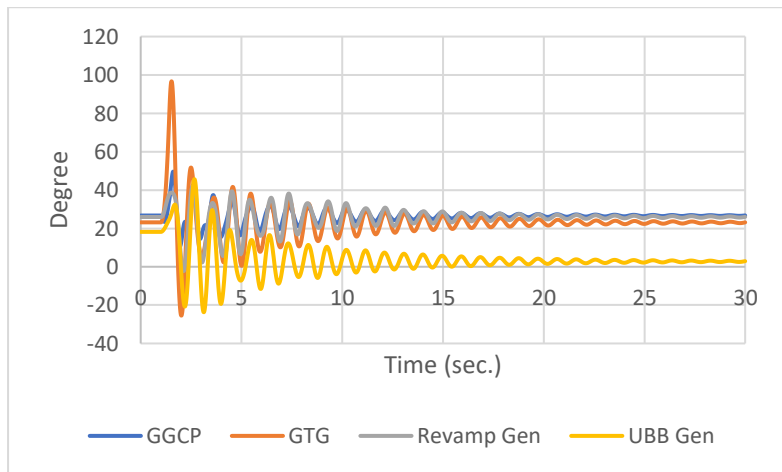
Gambar 4.18 Respon sudut rotor studi kasus 9 waktu pemutusan 0,47 s

Dari gambar 4.17 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,46 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.18 saat gangguan diputus pada waktu 0,47

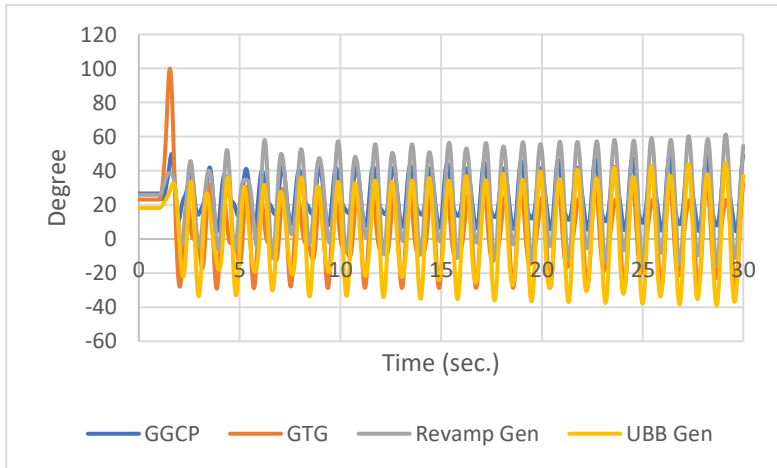
detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada semua generator mulai dari generator GGCP, generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus.

4.3.10 Studi Kasus 10: CCT pada BUS 11

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada BUS 11 dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu *CCT*. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai *CCT* berada pada waktu 0,42s – 0,43s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,42 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,43 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 10 ini dapat dilihat pada gambar 4.19 dan gambar 4.20.



Gambar 4.19 Respon sudut rotor studi kasus 10 waktu pemutusan 0,42 s

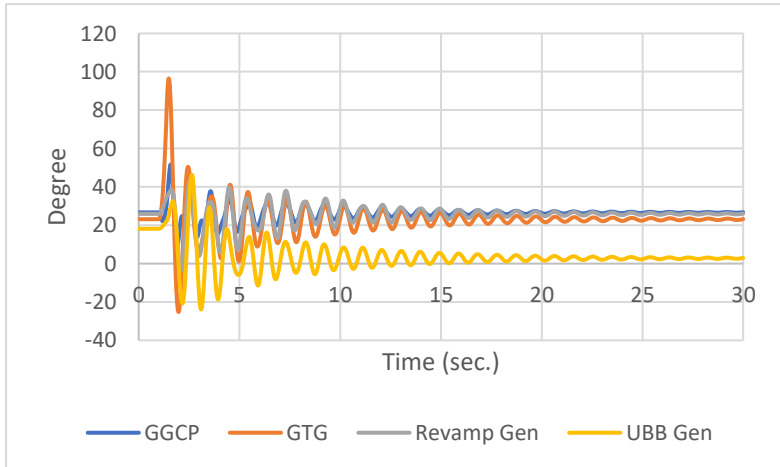


Gambar 4.20 Respon sudut rotor studi kasus 10 waktu pemutusan 0,43 s

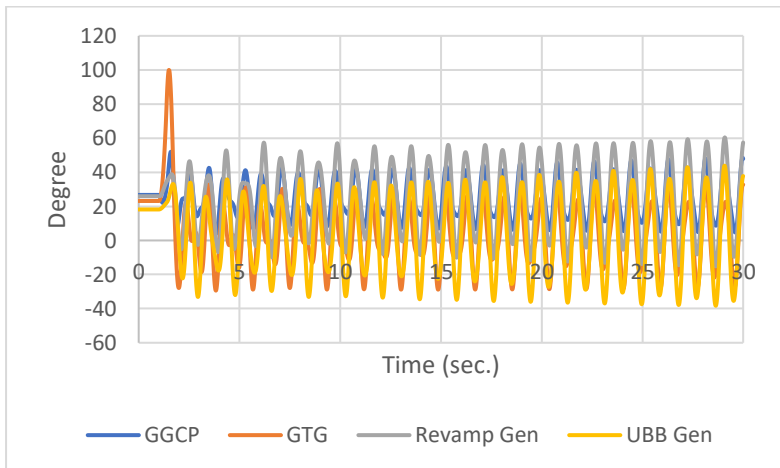
Dari gambar 4.19 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,42 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.20 saat gangguan diputus pada waktu 0,43 detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada semua generator mulai dari generator GGCP, generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus.

4.3.11 Studi Kasus 11: CCT pada BUS GTG

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada BUS GTG dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 0,38s – 0,39s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,38 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,39 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 11 ini dapat dilihat pada gambar 4.21 dan gambar 4.22.



Gambar 4.21 Respon sudut rotor studi kasus 11 waktu pemutusan 0,38 s



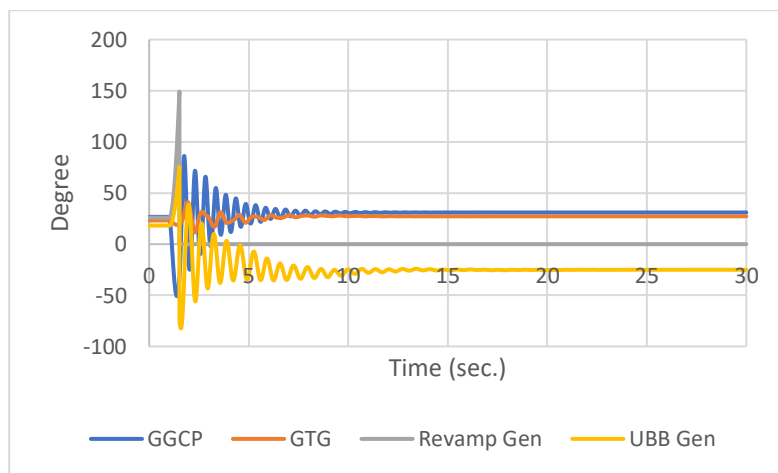
Gambar 4.22 Respon sudut rotor studi kasus 11 waktu pemutusan 0,39 s

Dari gambar 4.21 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,38 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.22 saat gangguan diputus pada waktu 0,39

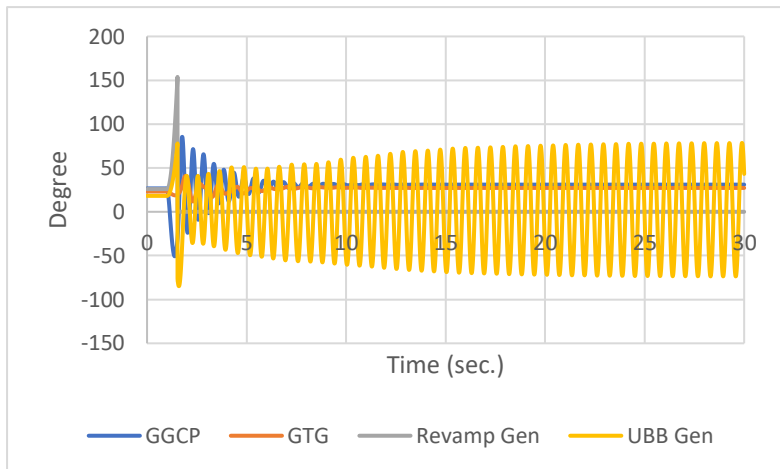
detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada semua generator mulai dari generator GGCP, generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus.

4.3.12 Studi Kasus 12: CCT pada bus HVS-02.A/20KV

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus HVS-02.A/20KV dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 0,52s – 0,53s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,52 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,53 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 12 ini dapat dilihat pada gambar 4.23 dan gambar 4.24.



Gambar 4.23 Respon sudut rotor studi kasus 12 waktu pemutusan 0,52 s

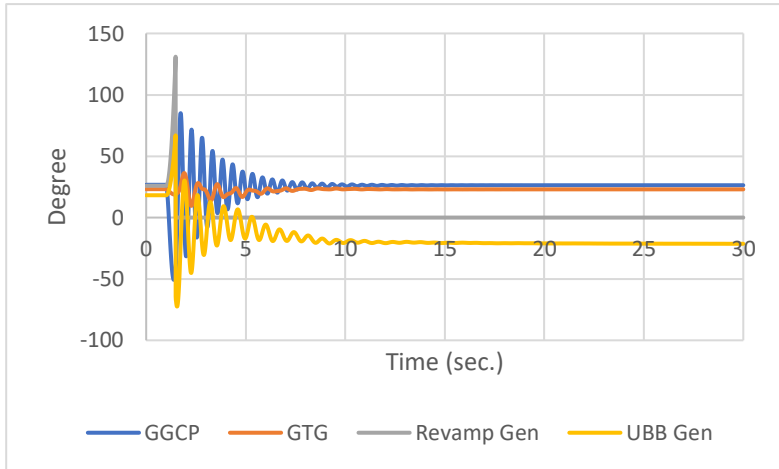


Gambar 4.24 Respon sudut rotor studi kasus 12 waktu pemutusan 0,53 s

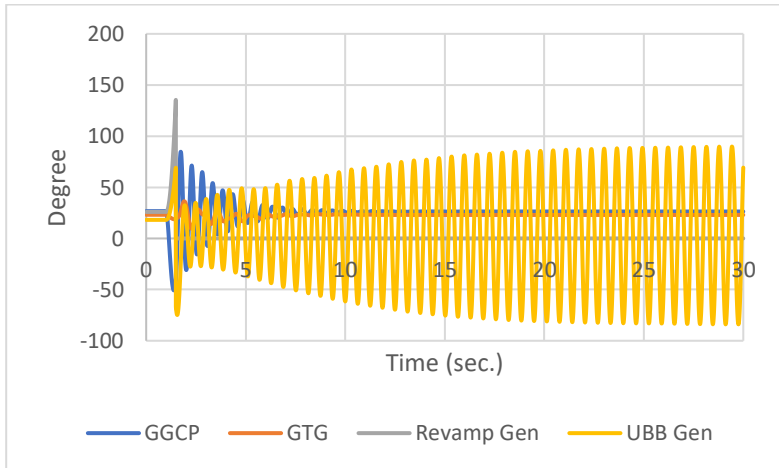
Dari gambar 4.23 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,52 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.24 saat gangguan diputus pada waktu 0,53 detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus.

4.3.13 Studi Kasus 13: CCT pada bus HVS-02.A/20KV B

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus HVS-02.A/20KV B dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 0,48s – 0,49s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,48 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,49 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 13 ini dapat dilihat pada gambar 4.25 dan gambar 4.26.



Gambar 4.25 Respon sudut rotor studi kasus 13 waktu pemutusan 0,48 s



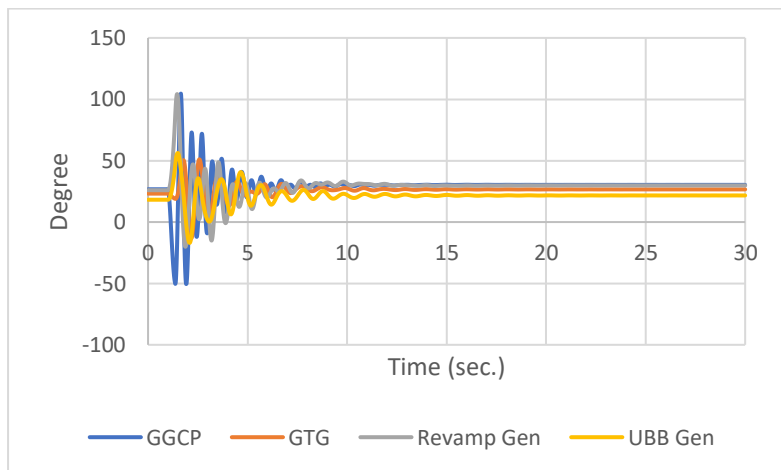
Gambar 4.26 Respon sudut rotor studi kasus 13 waktu pemutusan 0,49 s

Dari gambar 4.25 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,48 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.26 saat gangguan diputus pada waktu 0,49

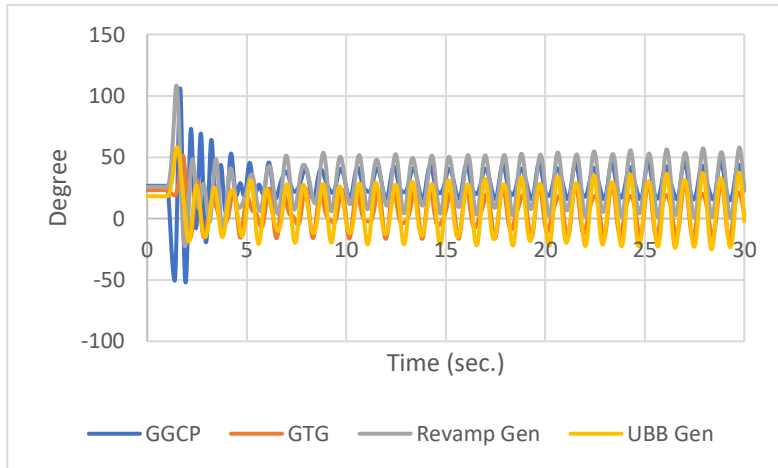
detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus.

4.3.14 Studi Kasus 14: CCT pada bus HVS-00-20KV/UT-L-P B

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus HVS-00-20KV/UT-L-P B dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 0,37s – 0,38s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,37 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,38 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 14 ini dapat dilihat pada gambar 4.27 dan gambar 4.28.



Gambar 4.27 Respon sudut rotor studi kasus 14 waktu pemutusan 0,37 s

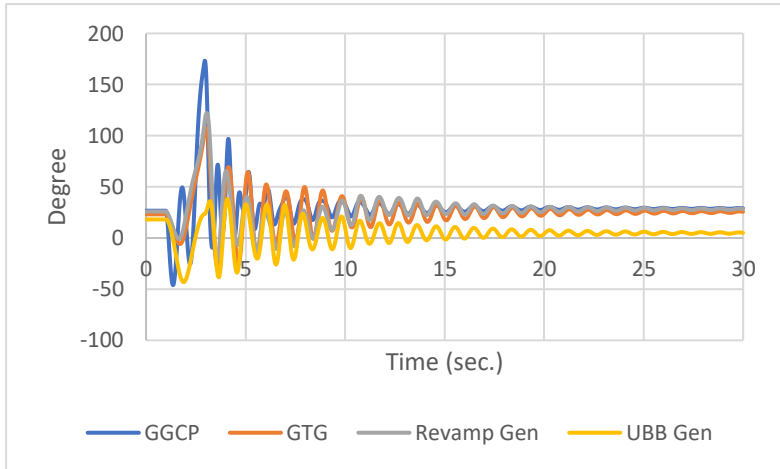


Gambar 4.28 Respon sudut rotor studi kasus 14 waktu pemutusan 0,38 s

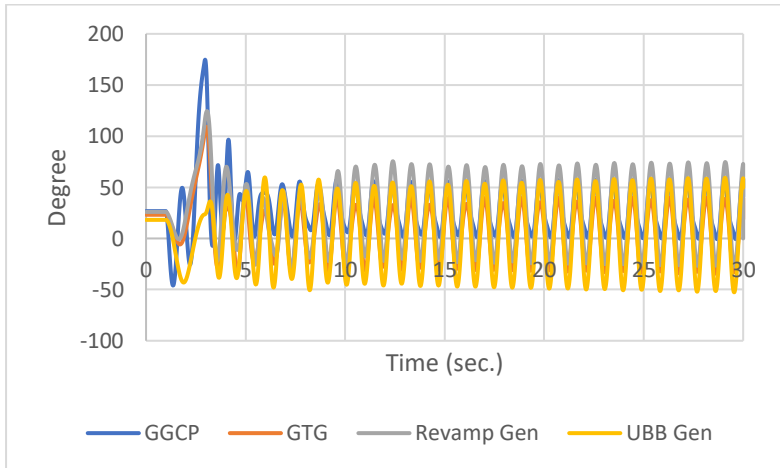
Dari gambar 4.27 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,37 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.28 saat gangguan diputus pada waktu 0,38 detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada semua generator mulai dari generator GGCP, generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus.

4.3.15 Studi Kasus 15: CCT pada bus HVS-00-20KV/UT-L-P

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus HVS-00-20KV/UT-L-P dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 1,93s – 1,94s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 1,93 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 1,94 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 15 ini dapat dilihat pada gambar 4.29 dan gambar 4.30.



Gambar 4.29 Respon sudut rotor studi kasus 15 waktu pemutusan 1,93 s



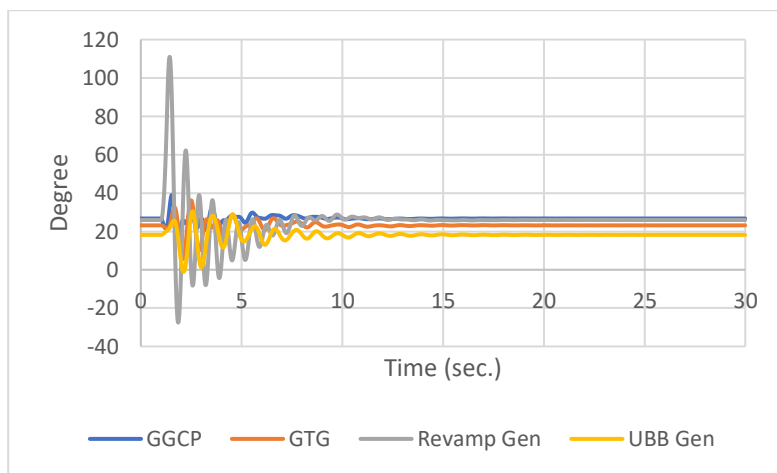
Gambar 4.30 Respon sudut rotor studi kasus 15 waktu pemutusan 1,94 s

Dari gambar 4.29 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 1,93 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.30 saat gangguan diputus pada waktu 1,94

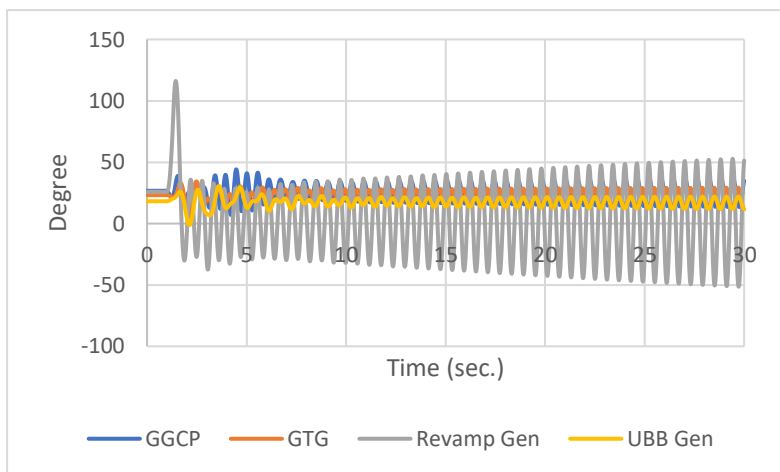
detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada semua generator mulai dari generator GGCP, generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus.

4.3.16 Studi Kasus 16: CCT pada bus SS1000

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus SS1000 dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 0,31s – 0,32s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,31 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,32 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 16 ini dapat dilihat pada gambar 4.31 dan gambar 4.32.



Gambar 4.31 Respon sudut rotor studi kasus 16 waktu pemutusan 0,31 s

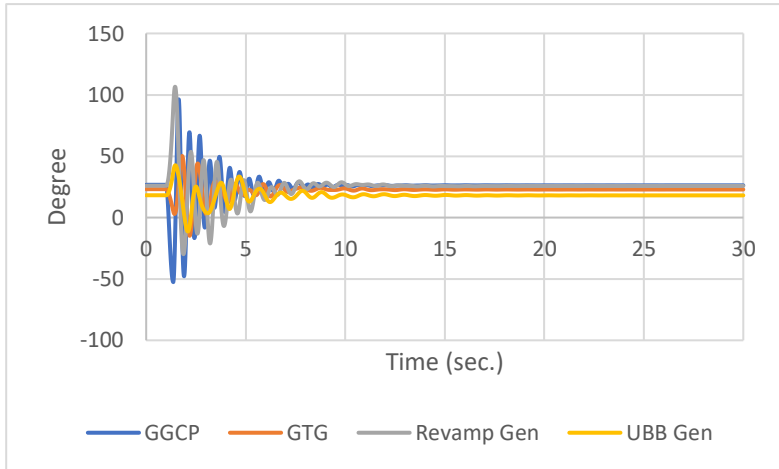


Gambar 4.32 Respon sudut rotor studi kasus 16 waktu pemutusan 0,32 s

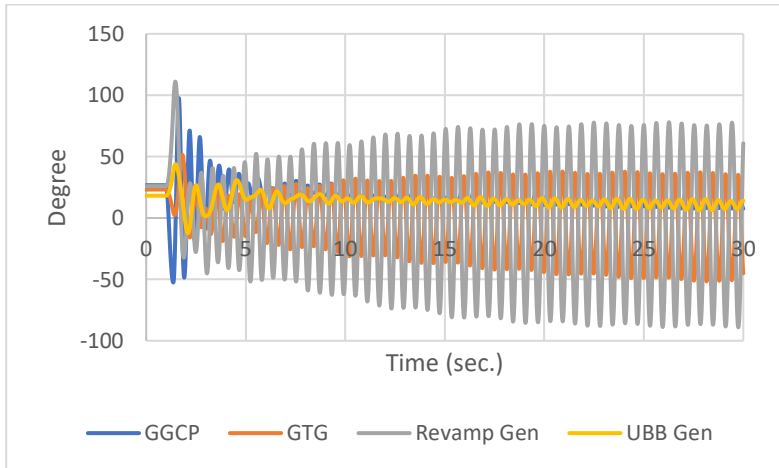
Dari gambar 4.31 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,31 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.32 saat gangguan diputus pada waktu 0,32 detik, sistem menjadi tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada semua generator mulai dari generator GGCP, generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus.

4.3.17 Studi Kasus 17: CCT pada bus SS1000 20 KV

Pada studi kasus ini akan disimulasikan terjadinya hubung singkat tiga fasa pada bus SS1000 20 KV dan akan diamati respon sudut rotor saat gangguan diisolir atau *circuit breaker* dibuka untuk menemukan waktu CCT. Gangguan diasumsikan terjadi pada waktu $t=1$ detik. Setelah dilakukan analisis maka dapat ditemukan nilai CCT berada pada waktu 0,36s – 0,37s atau dengan kata lain sistem masih stabil apabila gangguan diputus saat 0,36 detik dan menjadi tidak stabil apabila gangguan diputus saat 0,37 detik. Grafik respon sudut rotor studi kasus 16 ini dapat dilihat pada gambar 4.33 dan gambar 4.34.



Gambar 4.33 Respon sudut rotor studi kasus 17 waktu pemutusan 0,36 s



Gambar 4.34 Respon sudut rotor studi kasus 17 waktu pemutusan 0,37 s

Dari gambar 4.33 dapat dilihat bahwa saat gangguan diputus pada waktu 0,36 detik, semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan. Sedangkan pada gambar 4.34 saat gangguan diputus pada waktu 0,37

Tabel 4.2 Perbandingan waktu *trip* rele pengaman eksisting PT. Petrokimia Gresik dengan hasil *CCT*

No.	Bus ID	Waktu Trip Rele	Nilai CCT	Keterangan
1	11 KV MVSWGR	0.95s	0.25s-0.26s	Perlu Rekomendasi
2	20 KV MVSWGR	0.53s	0.62s-0.63s	Aman
3	BUS11A	0.32s	0.64s-0.65s	Aman
4	20BUS86	0.54s	0.39s-0.40s	Perlu Rekomendasi
5	HVS-00-20KV/GI A	0.95s	0.40s-0.41s	Perlu Rekomendasi
6	HVS-00-20KV/GI B	0.66s	0.36s-0.37s	Perlu Rekomendasi
7	UBB 6 KV	0.25s	0.73s-0.74s	Aman
8	UBB 20 KV A	0.95s	0.37s-0.38s	Perlu Rekomendasi
9	UBB 20 KV B	0.74s	0.46s-0.47s	Perlu Rekomendasi
10	BUS 11	0.35s	0.42s-0.43s	Aman
11	BUS GTG	0.94s	0.38s-0.39s	Perlu Rekomendasi
12	HVS-02.A/20KV	0.51s	0.52s-0.53s	Aman
13	HVS-02.A/20KV B	0.76s	0.48s-0.49s	Perlu Rekomendasi
14	HVS-00-20KV/UT-L-P B	0.33s	0.37s-0.38s	Aman
15	HVS-00-20KV/UT-L-P	0.55s	1.93s-1.94s	Aman
16	SS1000	0.30s	0.31s-0.32s	Aman
17	SS1000 20 KV	0.35s	0.36s-0.37s	Aman

Dari tabel 4.2 dapat dilihat bahwa terdapat delapan *setting* waktu rele pengaman yang memerlukan perbaikan karena nilai waktu *trip*nya masih di atas hasil *CCT* yang ditemukan, antara lain bus 11 KV MVSWGR, 20BUS86, HVS-00-20KV/GI A, HVS-00-20KV/GI B, UBB 20 KV A, UBB 20 KV B, BUS GTG, dan HVS-02.A/20KV B.

4.5 Evaluasi *Setting* Waktu Rele Pengaman di PT. Petrokimia Gresik dengan Mempertimbangkan *Transient Stability Assessment*

Beberapa rele pengaman pada PT. Petrokimia Gresik masih bekerja mengisolir gangguan di atas nilai *CCT* yang ditemukan. Oleh karena itu, perlu adanya perbaikan atau rekomendasi untuk mengatasi permasalahan ini sehingga *setting* waktu rele pengaman yang mempertimbangkan *Transient Stability Assessment* dapat bekerja mengisolir gangguan di bawah nilai *CCT*.

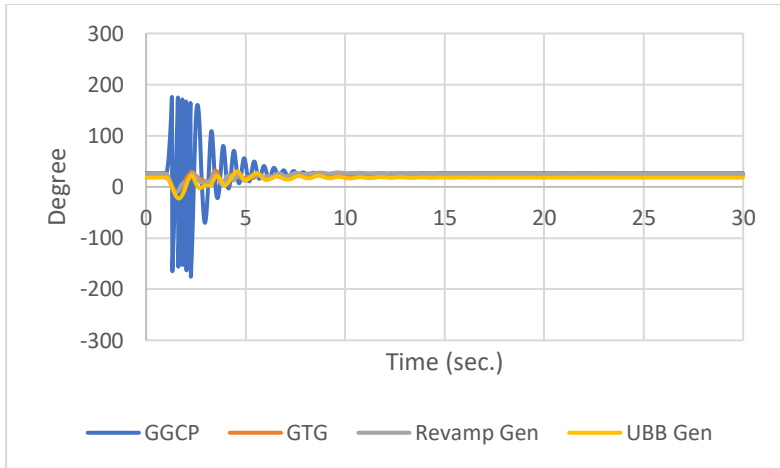
Pada Tugas Akhir ini, penulis memberikan rekomendasi yaitu menambahkan peralatan pengaman berupa rele diferensial yang akan dipasang pada bus-bus yang memerlukan rekomendasi. Hal ini dikarenakan pada saat terjadi gangguan pada bus tersebut, peralatan pengaman yang ada belum dapat bekerja mengisolir gangguan di bawah nilai *CCT*. Rele diferensial sendiri dipilih sebagai rekomendasi dikarenakan *setting* waktu rele pengaman eksisting sudah tidak dapat dilakukan *resetting* karena nilai *CCT* yang terlalu kecil sedangkan nilai koordinasi *setting* waktu rele pengaman dari bawah sudah besar. Alasan lainnya yaitu kemampuan rele diferensial yang dapat bekerja mengisolir gangguan dengan waktu yang sangat cepat. Rele diferensial dapat *disetting* dengan waktu kerja 1-3 *cycle* atau 0,02-0,06 detik sesuai dengan kebutuhan.

Tabel 4.3 Hasil Perbaikan *Setting* Waktu Rele Pengaman

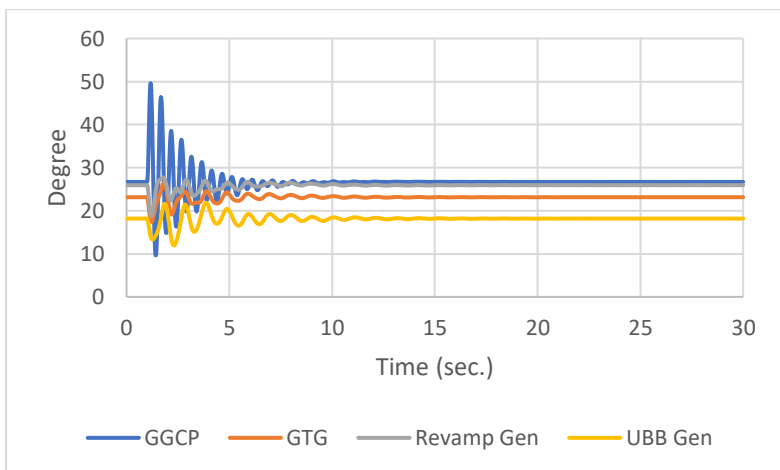
No.	Bus ID	Waktu Trip Rele	Nilai <i>CCT</i>	Keterangan
1	11 KV MVSWGR	0.072s	0.25s-0.26s	Aman
2	20BUS86	0.07s	0.39s-0.40s	Aman
3	HVS-00-20KV/GI A	0.072s	0.40s-0.41s	Aman
4	HVS-00-20KV/GI B	0.072s	0.36s-0.37s	Aman
5	UBB 20 KV A	0.072s	0.37s-0.38s	Aman
6	UBB 20 KV B	0.072s	0.46s-0.47s	Aman
7	BUS GTG	0.066s	0.38s-0.39s	Aman
8	HVS-02.A/20KV B	0.09s	0.48s-0.49s	Aman

Setelah dilakukan evaluasi *setting* waktu rele pengaman di PT. Petrokimia Gresik dan melakukan perbaikan dengan memberikan peralatan pengaman tambahan berupa rele diferensial, maka semua

respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah evaluasi pada bus 11 KV MVSWGR dapat dilihat pada gambar 4.37 dan gambar 4.38.



Gambar 4.37 Respon sudut rotor studi kasus bus 11 KV MVSWGR sebelum dilakukan evaluasi

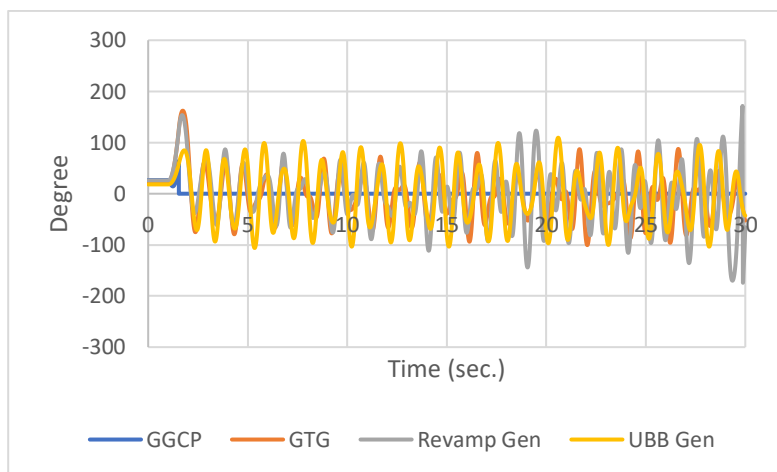


Gambar 4.38 Respon sudut rotor studi kasus bus 11 KV MVSWGR setelah dilakukan evaluasi

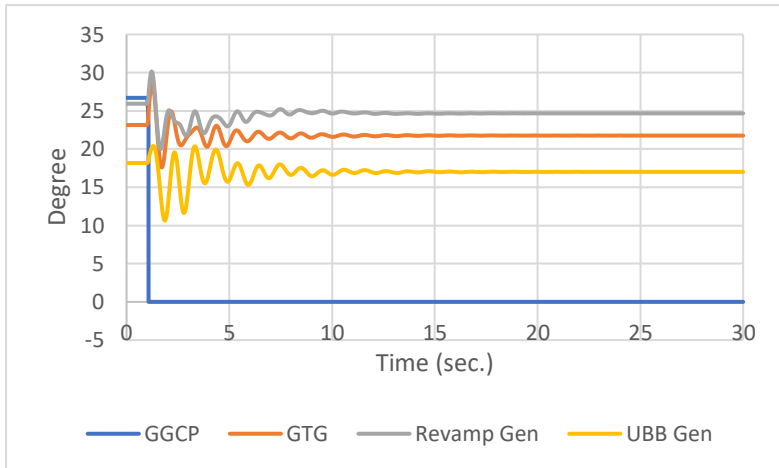
Dari gambar 4.37 dapat dilihat bahwa sebelum dilakukan evaluasi, respon sistem tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada generator GGCP yang mengayun dalam kondisi yang kritis beberapa kali. Sudut puncak kritis yang dicapai adalah $175,89^\circ$ dan sudut minimal yang dicapai adalah $-175,62^\circ$. Dalam hal ini, generator GGCP dapat dikatakan telah mengalami *step-out* atau lepas sinkron dari sistem. Sedangkan pada gambar 4.38 yaitu setelah penambahan rele diferensial, respon sistem menjadi stabil yang ditandai dengan respon semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan.

4.6.2 Evaluasi pada bus 20BUS86

Pada bagian ini akan ditampilkan perbandingan respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah dilakukan evaluasi dalam studi kasus bus 20BUS86. Sebelum evaluasi, gangguan hilang pada saat 0,54 detik. Sedangkan setelah dilakukan penambahan rele diferensial, gangguan dapat diisolir dengan waktu 0,07 detik. Perbandingan grafik respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah evaluasi pada bus 20BUS86 dapat dilihat pada gambar 4.39 dan gambar 4.40.



Gambar 4.39 Respon sudut rotor studi kasus bus 20BUS86 sebelum dilakukan evaluasi

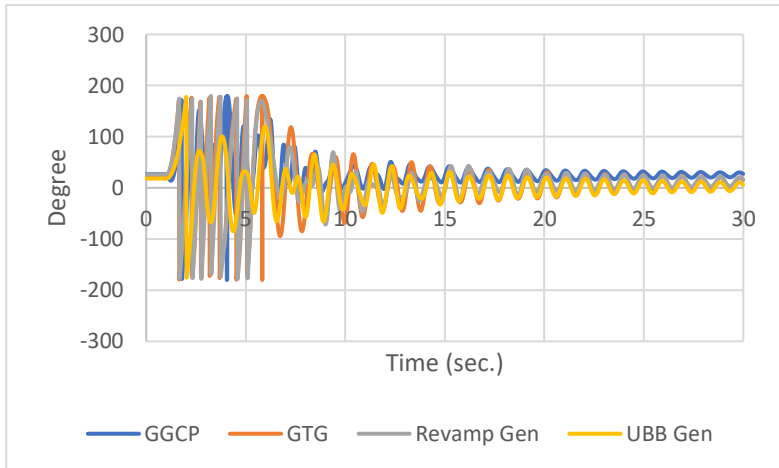


Gambar 4.40 Respon sudut rotor studi kasus bus 20BUS86 setelah dilakukan evaluasi

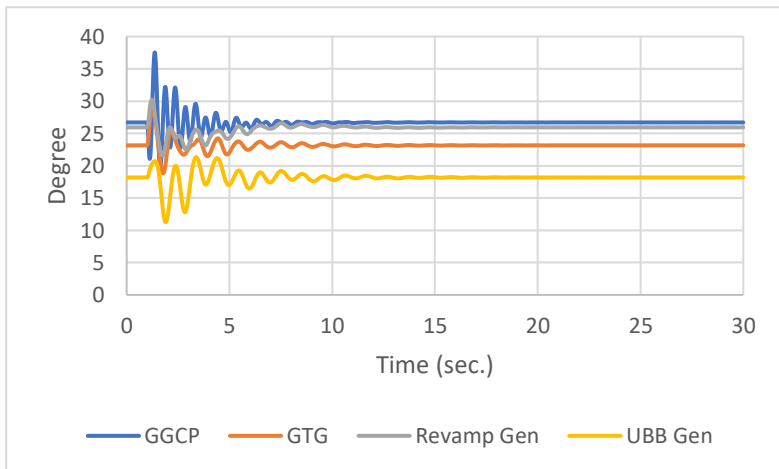
Dari gambar 4.39 dapat dilihat bahwa sebelum dilakukan evaluasi, respon sistem tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus. Sedangkan pada gambar 4.40 yaitu setelah penambahan rele diferensial, respon sistem menjadi stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor generator yang mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan.

4.6.3 Evaluasi pada bus HVS-00-20KV/GI A

Pada bagian ini akan ditampilkan perbandingan respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah dilakukan evaluasi dalam studi kasus bus HVS-00-20KV/GI A. Sebelum evaluasi, gangguan hilang pada saat 0,95 detik. Sedangkan setelah dilakukan penambahan rele diferensial, gangguan dapat diisolir dengan waktu 0,072 detik. Perbandingan grafik respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah evaluasi pada bus HVS-00-20KV/GI A dapat dilihat pada gambar 4.41 dan gambar 4.42.



Gambar 4.41 Respon sudut rotor studi kasus bus HVS-00-20KV/GI A sebelum dilakukan evaluasi



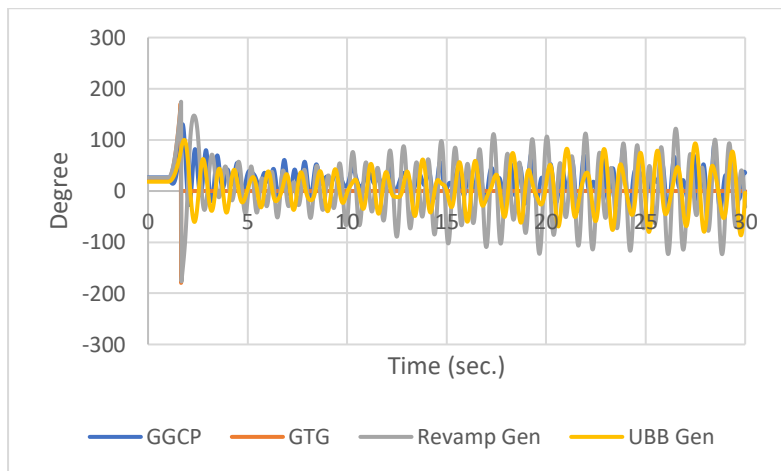
Gambar 4.42 Respon sudut rotor studi kasus bus HVS-00-20KV/GI A setelah dilakukan evaluasi

Dari gambar 4.41 dapat dilihat bahwa sebelum dilakukan evaluasi, respon sistem tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada

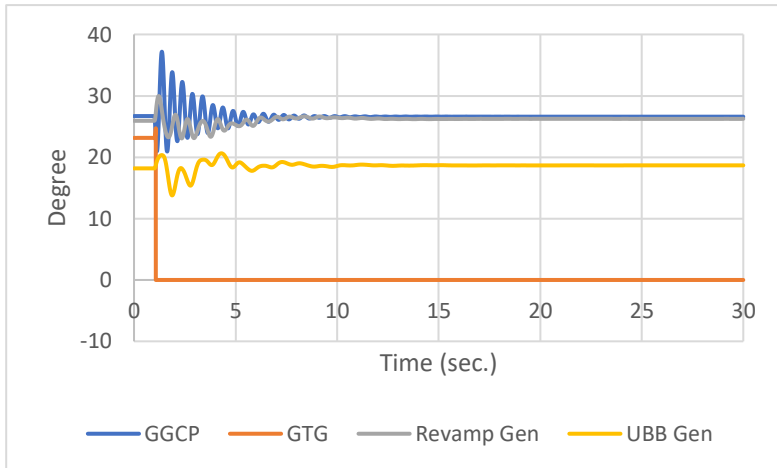
semua generator mulai dari generator GGCP, generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang sempat mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi. Sedangkan pada gambar 4.42 yaitu setelah penambahan rele diferensial, respon sistem menjadi stabil yang ditandai dengan respon semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan.

4.6.4 Evaluasi pada bus HVS-00-20KV/GI B

Pada bagian ini akan ditampilkan perbandingan respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah dilakukan evaluasi dalam studi kasus bus HVS-00-20KV/GI B. Sebelum evaluasi, gangguan hilang pada saat 0,66 detik. Sedangkan setelah dilakukan penambahan rele diferensial, gangguan dapat diisolir dengan waktu 0,072 detik. Perbandingan grafik respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah evaluasi pada bus HVS-00-20KV/GI B dapat dilihat pada gambar 4.43 dan gambar 4.44.



Gambar 4.43 Respon sudut rotor studi kasus bus HVS-00-20KV/GI B sebelum dilakukan evaluasi

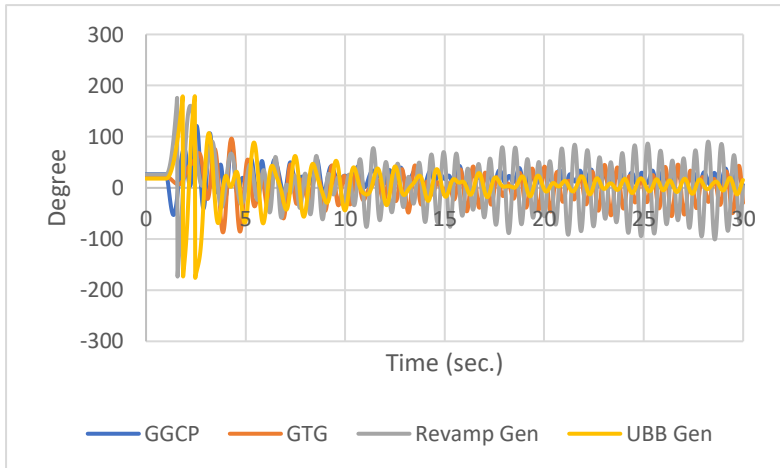


Gambar 4.44 Respon sudut rotor studi kasus bus HVS-00-20KV/GI B setelah dilakukan evaluasi

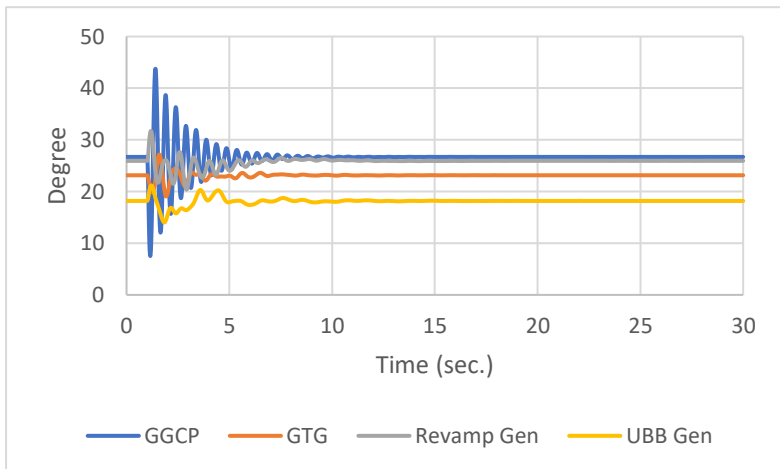
Dari gambar 4.43 dapat dilihat bahwa sebelum dilakukan evaluasi, respon sistem tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada generator GGCP, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus. Sedangkan pada gambar 4.44 yaitu setelah penambahan rele diferensial, respon sistem menjadi stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor generator yang mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan.

4.6.5 Evaluasi pada bus UBB 20 KV A

Pada bagian ini akan ditampilkan perbandingan respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah dilakukan evaluasi dalam studi kasus bus UBB 20 KV A. Sebelum evaluasi, gangguan hilang pada saat 0,95 detik. Sedangkan setelah dilakukan penambahan rele diferensial, gangguan dapat diisolir dengan waktu 0,072 detik. Perbandingan grafik respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah evaluasi pada bus UBB 20 KV A dapat dilihat pada gambar 4.45 dan gambar 4.46



Gambar 4.45 Respon sudut rotor studi kasus bus UBB 20 KV A sebelum dilakukan evaluasi



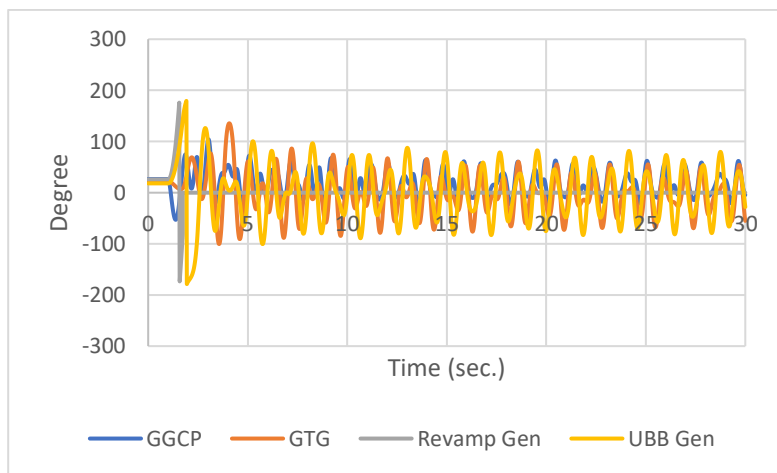
Gambar 4.46 Respon sudut rotor studi kasus bus UBB 20 KV A setelah dilakukan evaluasi

Dari gambar 4.45 dapat dilihat bahwa sebelum dilakukan evaluasi, respon sistem tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada

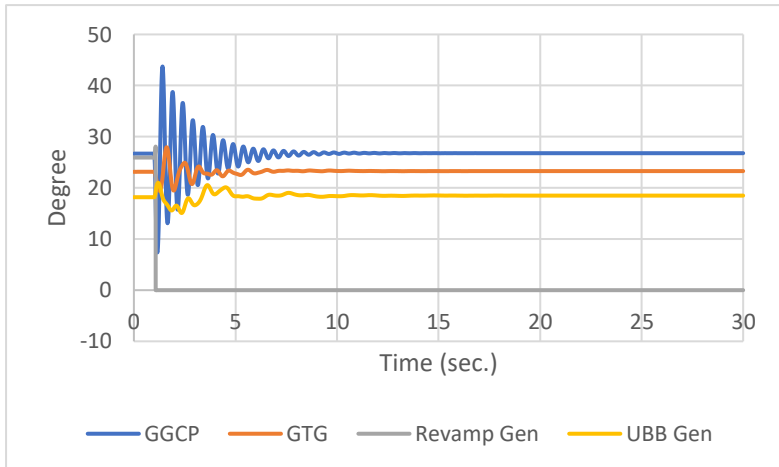
semua generator mulai dari generator GGCP, generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus-menerus. Sedangkan pada gambar 4.46 yaitu setelah penambahan rele diferensial, respon sistem menjadi stabil yang ditandai dengan respon semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan.

4.6.6 Evaluasi pada bus UBB 20 KV B

Pada bagian ini akan ditampilkan perbandingan respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah dilakukan evaluasi dalam studi kasus bus UBB 20 KV B. Sebelum evaluasi, gangguan hilang pada saat 0,74 detik. Sedangkan setelah dilakukan penambahan rele diferensial, gangguan dapat diisolir dengan waktu 0,072 detik. Perbandingan grafik respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah evaluasi pada bus UBB 20 KV B dapat dilihat pada gambar 4.47 dan gambar 4.48.



Gambar 4.47 Respon sudut rotor studi kasus bus UBB 20 KV B sebelum dilakukan evaluasi

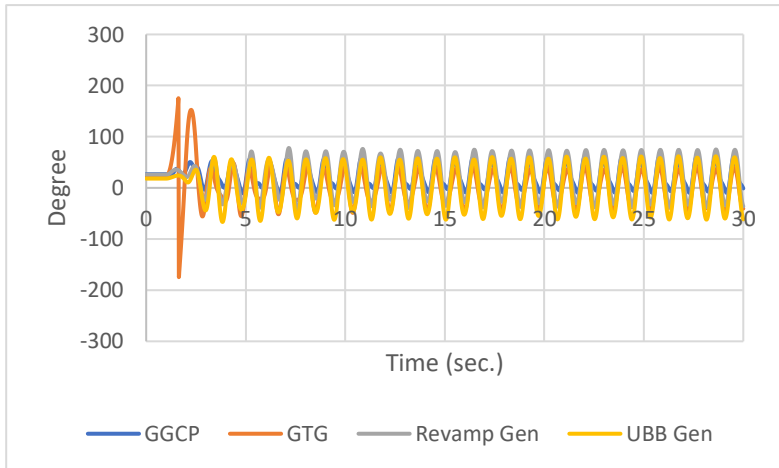


Gambar 4.48 Respon sudut rotor studi kasus bus UBB 20 KV B setelah dilakukan evaluasi

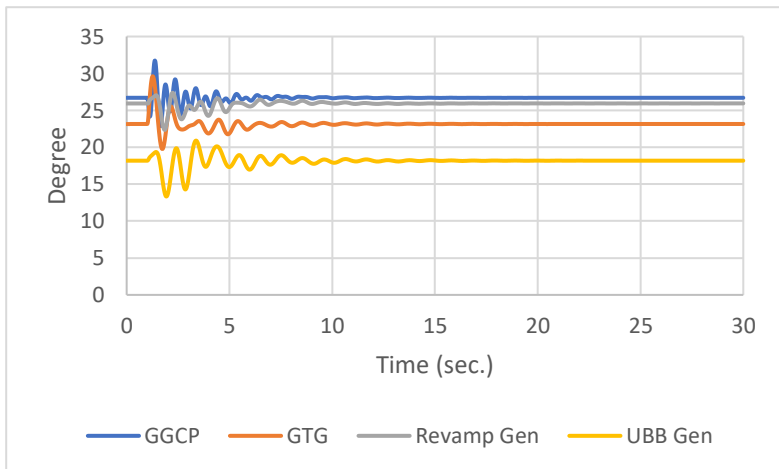
Dari gambar 4.47 dapat dilihat bahwa sebelum dilakukan evaluasi, respon sistem tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada generator GGCP, generator GTG, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus menerus. Sedangkan pada gambar 4.48 yaitu setelah penambahan rele diferensial, respon sistem menjadi stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor generator yang mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan.

4.6.7 Evaluasi pada BUS GTG

Pada bagian ini akan ditampilkan perbandingan respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah dilakukan evaluasi dalam studi kasus BUS GTG. Sebelum evaluasi, gangguan hilang pada saat 0,94 detik. Sedangkan setelah dilakukan penambahan rele diferensial, gangguan dapat diisolir dengan waktu 0,066 detik. Perbandingan grafik respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah evaluasi pada BUS GTG dapat dilihat pada gambar 4.49 dan gambar 4.50.



Gambar 4.49 Respon sudut rotor studi kasus BUS GTG sebelum dilakukan evaluasi



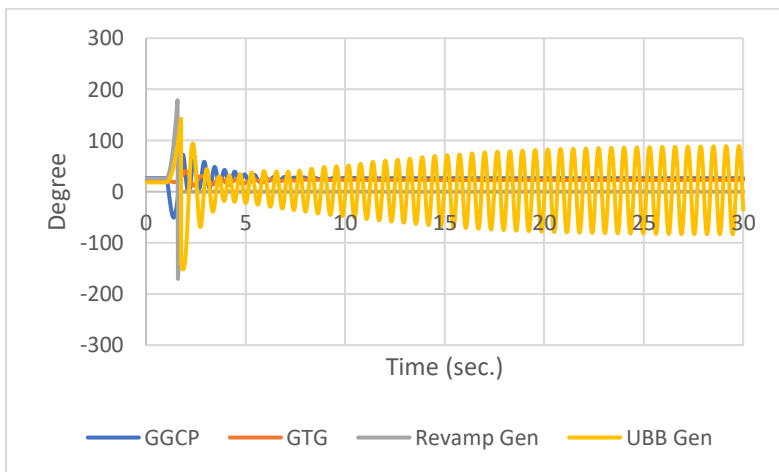
Gambar 4.50 Respon sudut rotor studi kasus BUS GTG setelah dilakukan evaluasi

Dari gambar 4.49 dapat dilihat bahwa sebelum dilakukan evaluasi, respon sistem tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada

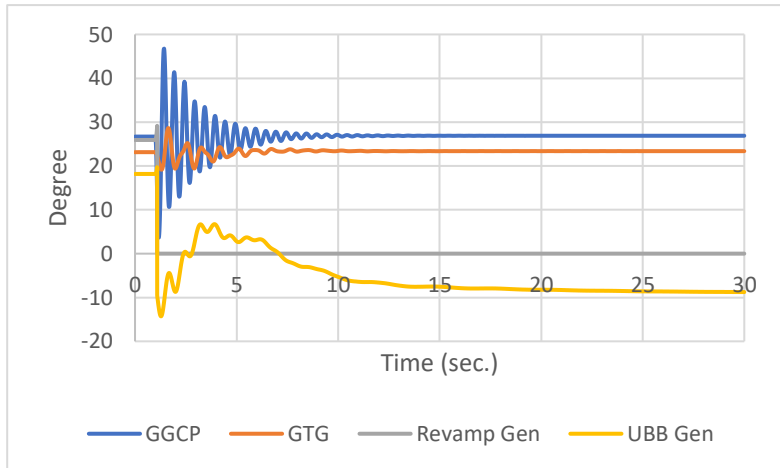
semua generator mulai dari generator GGCP, generator GTG, Revamp Gen, dan UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus-menerus. Sedangkan pada gambar 4.50 yaitu setelah penambahan rele diferensial, respon sistem menjadi stabil yang ditandai dengan respon semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan.

4.6.8 Evaluasi pada bus HVS-02.A/20KV B

Pada bagian ini akan ditampilkan perbandingan respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah dilakukan evaluasi dalam studi kasus bus HVS-02.A/20KV B. Sebelum evaluasi, gangguan hilang pada saat 0,76 detik. Sedangkan setelah dilakukan penambahan rele diferensial, gangguan dapat diisolir dengan waktu 0,09 detik. Perbandingan grafik respon sudut rotor generator sebelum dan sesudah evaluasi pada bus HVS-02.A/20KV B dapat dilihat pada gambar 4.51 dan gambar 4.52.



Gambar 4.51 Respon sudut rotor studi kasus bus HVS-02.A/20 KV B sebelum dilakukan evaluasi



Gambar 4.52 Respon sudut rotor studi kasus bus HVS-02.A/20 KV B setelah dilakukan evaluasi

Dari gambar 4.51 dapat dilihat bahwa sebelum dilakukan evaluasi, respon sistem tidak stabil yang ditandai dengan respon sudut rotor pada UBB Gen yang mengalami osilasi dengan kenaikan dan penurunan sudut yang cukup tinggi secara terus-menerus. Sedangkan pada gambar 4.52 yaitu setelah penambahan rele diferensial, respon sistem menjadi stabil yang ditandai dengan respon semua sudut rotor generator mampu kembali dalam kondisi stabilnya dan masih sesuai standar yang diperbolehkan.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari simulasi dan analisis data yang telah dilakukan pada Tugas Akhir ini, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai *critical clearing time* dapat ditemukan dengan melihat respon sudut rotor generator ketika gangguan diisolir.
2. Dari simulasi dan analisis data yang telah dilakukan, dengan mempertimbangkan *transient stability assessment*, maka terdapat delapan *setting* waktu rele pengaman pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik yang memerlukan perbaikan karena nilai waktu *trip*nya masih di atas nilai *CCT* yang ditemukan, antara lain bus 11 KV MVSWGR, bus 20BUS86, bus HVS-00-20KV/GI A, bus HVS-00-20KV/GI B, bus UBB 20 KV A, bus UBB 20 KV B, BUS GTG, dan bus HVS-02.A/20KV B.
3. Untuk melakukan perbaikan *setting* waktu rele pengaman, maka direkomendasikan untuk memberikan peralatan pengaman tambahan berupa rele diferensial sehingga ketika terjadi gangguan *short circuit* dapat diisolir dengan waktu 1-3 *cycle* agar sistem dapat kembali stabil.

5.2 Saran

Mengacu pada hasil Tugas Akhir ini, maka saran yang dapat diberikan penulis antara lain:

1. Nilai *critical clearing time* yang telah didapatkan pada Tugas Akhir ini dapat dijadikan pertimbangan untuk perbaikan *setting* waktu rele pengaman dengan mempertimbangkan *transient stability assessment* pada sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik yang sebenarnya.
2. Sebaiknya dalam melakukan *setting* waktu rele pengaman pada sistem kelistrikan sebenarnya juga mempertimbangkan *transient stability assessment*, terutama pada daerah pembangkit.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anderson, P. M., *Power System Protection*. John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [3] H. Saadat, *Power System Analysis*. Singapura: McGraw-Hill, Inc., 2004.
- [4] “Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug. 2004.
- [5] S. Atmaja, “Perhitungan Critical Clearing Time dengan Menggunakan Metode Time Domain Simulation,” Surabaya, 2012.
- [6] M. M. I. Fathoni, “Analisis Setting Waktu Rele Pengaman di PT. Pupuk Sriwidjaja dengan Mempertimbangkan Transient Stability Assessment,” Surabaya, 2016.
- [7] “IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems,” *IEEE Std 242-2001TM*, Dec. 2001.
- [8] J. C. Das, *Transient in Electrical System, Analysis, Recognition, and Mitigation*. McGraw-Hill, Inc., 2010.
- [9] “IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants,” *IEEE Std C37106-2003*, 2004.
- [10] “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,” *IEEE Std 1159-2009*, 2009.
- [11] W. D. Stevenson Jr. and J. J. Granger, *Elements of Power System Analysis, 4th Edition*. McGraw-Hill, Inc., 1994.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Setting Governor Generator GGCP:

Type	Mode	
GT	Droop	
Sample Data		
Droop	Pmax	Pmin
4	22	10
Tsr	Tc	Tt
0.15	0.1	0.1

Setting Governor Generator GTG:

Type	Mode						
GGOV3	Droop						
Sample Data							
R	Rselect	Ldref	Tpelec	Kimw	Pmwset	Kpgov	Kigov
0.04	1	1	2.5	0.002	0	10	1.33
Kdgov	Tdgov	Kpload	Kload	Ka	Ta	Aset	Dm
0	1	2	0.67	10	0.05	0.01	-2
Vmax	Vmin	Ffa	Ffb	Ffc	Ffd	Dnrate	Dnhi
1	0.15	0	1	1	1	0.0002	0.1
Dnlo	Ropen	Rclose	Rup	Rdown	Maxerr	Minerr	Kturb
-0.1	3.3	-3.3	2	-2	0.01	-0.01	1.8
Wfni	Tact	Tb	Tc	Db	Tsa	Tsb	Tfload
0.18	0.2	0.5	0	0	4	5	3
Tbd	Tcd	Teng	Cp	Cf	Flag	Turbate	
4	3	0	0	20	1	24	

Setting Governor Generator Revamp Gen:

Type	Mode		
ST	Droop		
Sample Data			
Droop	Pmax	Pmin	
5	17.5	0	
Fhp			
0.7			
Tsr	Tc	Tch	Trh
0.1	0.1	0.15	5

Setting Governor Generator UBB Gen:

Type	Mode	Priority
505	Droop	Load
Sample Data		
Droop 1	I1 <D>	SDR1
4	6	5
P1 <I>	I1 <I>	SDR1 <I>
3	6	5
L1	L2	Ta1
100	-30	1
Droop2	P2	I2
4	3	6
HPa	HPb	HPc
84	172	30
Sc	Smax	L3
-400	21000	100
EFmax	P1 <D>	
162	3	
Tm1	TS	
1	0.015	
SDR2	ExtPress	ExtFlow
5	1	1
HPmax	Sa	Sb
172	24865	9600
L4	Ta2	Tm2
0	1	1

BIOGRAFI PENULIS



Fauzan Fakhru Arifin, lahir di Ngawi, Jawa Timur pada tanggal 10 November 1995. Penulis lulus pendidikan jenjang Sekolah Menengah Atas dari SMA Negeri 1 Sidoarjo pada tahun 2014. Semenjak tahun 2014, penulis terdaftar sebagai mahasiswa bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama kuliah, penulis aktif di beberapa kegiatan kepanitiaan dan organisasi.

Penulis juga aktif sebagai asisten Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST B204) ITS. Penulis dapat dihubungi melalui email fauzanfakhru@gmail.com.